

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ISABELA ERENO DA SILVA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE CONCRETO REFORÇADO
COM MACRO FIBRAS DE POLIETILENO POR MEIO DO ENSAIO DE PUSH-OFF**

CURITIBA

2024

ISABELA ERENO DA SILVA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE CONCRETO REFORÇADO
COM MACRO FIBRAS DE POLIETILENO POR MEIO DO ENSAIO DE PUSH-OFF**

**Analysis of the shear resistance of polyethylene macro fibers reinforced
concrete through push-off test**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris.

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ISABELA ERENO DA SILVA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM MACRO FIBRAS DE POLIETILENO POR MEIO DO ENSAIO DE PUSH-OFF

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 27 de Março de 2024

Dr. Elyson Andrew Pozo Liberati, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Gustavo De Miranda Saleme Gidrao, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Joao Elias Abdalla Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 19/07/2024.

Aos meus pais e à minha irmã, Manuela.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos, direcionam-se, primeiramente a meus pais, que me proporcionaram educação, apoio e valores, e à minha irmã, minha amiga para a vida, que me ensinou a compartilhar. Agradeço aos colegas de sala e laboratório pela companhia e conversas que tornavam os dias mais leves. Todos os professores e colaboradores da UTFPR, campus Curitiba e Toledo, por me proporcionarem todo o aprendizado até aqui e por me auxiliarem quando necessitei. Agradeço ao Pedro, pelo apoio, companheirismo e parceria, por me ajudar a melhorar a cada dia.

Agradeço, especialmente, ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Savaris, por todo o conhecimento compartilhado e pelo auxílio que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer à Capes, pela bolsa disponibilizada ao projeto de número 40006018008P6.

RESUMO

Fibras são utilizadas como reforço estrutural em concretos, devido a possibilidade de transferência de tensões através das fissuras. Dentre suas principais finalidades pode-se citar melhoria de resistência à flexão, ao impacto e à fadiga, bem como melhoria na tenacidade e ductilidade das estruturas. Geralmente, no dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras, os valores de resistência ao cisalhamento são obtidos a partir da análise de flexão do elemento. Contudo, uma estrutura submetida a esforços puramente cortantes, tende a romper em locais de descontinuidade geométrica, sem que haja flexão. Dessa maneira, faz-se necessário um melhor entendimento sobre o comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras (CRF) sujeito a esforços cisalhantes. Para esta análise, um dos ensaios mais adotados é o *push-off*, no qual os corpos de prova são em formato de Z e suas principais vantagens são a redução das dimensões das amostras e a possibilidade de utilizar prensas mecânicas, o que proporciona maior viabilidade quanto à execução do ensaio e viabiliza estudos que demandem extensos grupos amostrais. A presente pesquisa visou estudar a resistência ao cisalhamento direto de concreto reforçado com macro fibras sintéticas, por meio do ensaio de *push-off*. O efeito da adição de macro fibras sintéticas à mistura do concreto foi avaliado por meio da trabalhabilidade em estado fresco, da resistência à compressão e da resistência a tração na flexão. Foi avaliada a possibilidade de utilizar equações da literatura e de prescrições normativas para estimar resistência ao cisalhamento do CRF e a possibilidade de substituição da armadura mínima de cisalhamento por macro fibras. Os volumes de fibra adicionados ao concreto foram de 0 kg/m³, 4,85 kg/m³ e 14,55 kg/m³. Realizou-se ensaios de resistência a compressão, de resistência à tração na flexão e de cisalhamento direto (*push-off*). Notou-se que as fibras reduziram consideravelmente a trabalhabilidade do concreto. A adição de 0,5% e 1,5% de fibras reduziu a resistência à compressão em 19,62% e 29,58%, respectivamente. Com relação à resistência à tração na flexão, a adição de fibras não influenciou na resistência do material. Apesar da adição de fibras não ter se mostrado positiva quanto à resistência do material, sua influência chamou atenção para as propriedades pós-fissuração do elemento. Os resultados apontaram que, quanto maior o volume de fibras utilizada, maior a resistência residual da matriz, mesmo após o elemento já fissurado, o que confirma a influência das fibras na redução da fragilidade do concreto. Ao avaliar a resistência ao cisalhamento, a adição de 0,5% e 1,5% de fibras acarretou redução de 19,89% e 23,41%, respectivamente. Porém, ao avaliar as resistências normalizadas, percebe-se que não há diferença estatística entre os valores, além de a redução da resistência ser de apenas 11%, para ambas as adições. Por fim, as equações preditivas se mostraram conservadoras para a mistura de referência e possivelmente aplicáveis às misturas com fibras.

Palavras-chave: fibras sintéticas; cisalhamento direto; *push-off*; concreto reforçado com fibras.

ABSTRACT

Fibers are employed as structural reinforcement in concrete, due to their ability to transfer stress through cracks. Flexural, impact, fatigue resistance, and toughness and ductility improvement are examples of fiber influence on concrete mixtures. For fiber-reinforced concrete designs, designers usually adopt shear strength values obtained through bending test results. However, a structure subjected to pure shear forces tends to fail at geometric discontinuity locations without flexural behavior. Therefore, a better understanding of fiber-reinforced concrete behavior under shear forces is necessary. For such analysis, one of the commonly adopted tests is the push-off test, in which specimens are in Z-shaped form. Its main advantages include the reduction of sample dimensions and the possibility of using mechanical presses, providing greater accessibility for test execution, and enabling studies with extensive sample groups. This research studied the direct shear strength of synthetic macro fiber-reinforced concrete, through push-off tests. The effect of fiber addition to the concrete mix was evaluated through workability, compressive strength, and flexural tensile strength. behavior between mixtures with and without fibers, as well as the addition of different fiber proportions to the mixture, was compared. The possibility of minimum shear reinforcement replacement by synthetic macro fiber and the possibility of using literature and standard equations to estimate the shear strength of fiber-reinforced concrete (FRC) were also investigated. The research comprised mixtures with fiber addition of 0 kg/m³, 4.85 kg/m³, and 14.55 kg/m³. Compressive strength, toughness, and direct-shear tests (push-off) were conducted. It was observed that the fibers significantly reduced the workability of concrete. The addition of 0.5% and 1.5% fibers reduced the compressive strength by 19.62% and 29.58%, respectively. Fiber addition did not influence significantly the tensile strength in flexion. Despite the negative impact on material strength, fiber addition drew attention to the post-cracking behavior of the element. Results indicated that the higher the fiber content used, the greater was matrix's residual strength, even after the element had already cracked, confirming the influence of fibers in reducing concrete's brittleness. When evaluating shear strength, the addition of 0.5% and 1.5% of fibers resulted in a reduction of 19.89% and 23.41%, respectively. However, for the normalized resistances, there is no statistical difference between the values, in addition to the resistance reduction of 11%, for both fiber volumes. Predictive equations proved to be conservative for the reference mix and possibly applicable to fiber-reinforced mixes.

Keywords: synthetic fibers; direct shear; push-off; fiber reinforced concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da concentração de tensões no concreto (a) sem e (b) com fibras	22
Figura 2 – Curvas esquemáticas de carregamento vs. deformação para a) concreto reforçado com fibras de aço e b) concreto reforçado com fibras de polietileno	25
Figura 3 – Curvas de carga x deflexão com diferentes volumes de fibra de polietileno	26
Figura 4 – Influência do volume crítico de fibras à mistura do concreto, durante o ensaio de tração na flexão	27
Figura 5 – Possíveis distribuições de tensão ao longo do comprimento de uma fibra, em função do comprimento crítico	28
Figura 6 – Fissuração entre matriz e agregados	33
Figura 7 – Transferência de tensões cisalhantes pelo engrenamento de agregados	34
Figura 8 – Representação do modelo atrito-cisalhamento	36
Figura 9 – Teoria atrito-cisalhamento	38
Figura 10 – Modelo de corpo de prova para ensaio de <i>push-off</i>	42
Figura 11 – Padrão de pontos para correlação de imagem digital	43
Figura 12 – Preparação das amostras para CID	44
Figura 13 – Fluxograma das atividades	51
Figura 14 – Macro fibra sintética	53
Figura 15 – Ensaio de tenacidade: disposição dos LVDTs	54
Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de <i>push-off</i> , em mm	55
Figura 17 – Representação da armadura utilizada nos corpos de prova para ensaio de <i>push-off</i> , com dimensões em mm	55
Figura 18 – Forma e armadura dos corpos de prova com armadura da seção transversal	56
Figura 19 – Instrumentação do ensaio de <i>push-off</i>	57
Figura 20 – Verificação da qualidade da imagem	58
Figura 21 – Pontos para análise da abertura de fissuras	58
Figura 22 – Resistência à tração na flexão	64
Figura 23 – Comparação entre os valores de CMOD obtidos por LVDTs e por CID	65
Figura 24 – Tensão cisalhante vs. abertura de fissuras	67
Figura 25 – Deslocamento vertical da fissura	70
Figura 26 – CR2 após ensaio de <i>push-off</i>	71

Figura 27 – RMSE e DPC.....	73
Figura 28 – Tensões de cisalhamento normalizadas relacionadas ao volume de fibras	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações preditivas de resistência ao cisalhamento	39
Tabela 2 – Equações preditivas de resistência ao cisalhamento	40
Tabela 3 – Coeficientes de atrito.....	41
Tabela 4 – Ensaio necessários ao desenvolvimento da pesquisa.....	51
Tabela 5 – Caracterização dos agregados	52
Tabela 6 – Propriedades das macro fibras sintéticas	53
Tabela 7 – Traço para produção de 1m ³ de concreto.....	53
Tabela 8 – Classificação DPC.....	60
Tabela 9 – Resistência à compressão	61
Tabela 10 – Resistência à tração na flexão (MPa)	62
Tabela 11 – LOP, em N/mm ²	63
Tabela 12 – Resistências residuais, em N/mm ²	63
Tabela 13 – Resistência ao cisalhamento direto (MPa)	66
Tabela 14 – Relação de tensão máxima de cisalhamento, w máximo e δ máximo	68
Tabela 15 – Dados para equações	72
Tabela 16 – Resistências ao cisalhamento	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (ALFABÉTICA)

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CID	Correlação de imagem digital
CRF	Concreto reforçado com fibras
DMC	Dimensão máxima característica
DPC	Classificação por Pontos de Demérito de Collins
EFNARC	European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures
LED	Light-Emitting Diode
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NBR	Norma Brasileira
PVA	Polivinil-álcool
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_n	Tensão normal externa
σ_{nt}	Tensão tangencial
τ_n	Tensão de cisalhamento normalizada
τ_u	Tensão última resistente de cisalhamento
σ_s	Tensão de tração na armadura
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento
ϕ	Inclinação dos dentes da interface fissurada
μ	Coefficiente de atrito
ρ_y	Taxa geométrica de armadura transversal à interface
δ	Deslocamento da fissura
ρ_w	Taxa de armadura
ρ_{sw}	Taxa de armadura no plano de cisalhamento
α	Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal
w	Abertura da fissura
f_{cm}	Resistência à compressão média do concreto
S	Deslizamento relativo entre superfícies
F	Força aplicada à interface
N	Força normal de compressão
R	Força resistente de cisalhamento
A_{sw}	Área de armadura no plano de cisalhamento
f_y	Resistência ao escoamento do aço
f_c	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
c	Coesão
A_s	Área de aço
A_c	Área de concreto
f_{cc}	Resistência à compressão do corpo de prova cúbico de concreto
f_{ck}	Resistência à compressão característica do concreto
V_u	Força última de cisalhamento
C_f	Constante de efetividade do agregado

s	Espaçamento dos estribos, segundo o eixo longitudinal do elemento
b_w	Largura média da alma ao longo da altura útil da seção
A_t	Valor observado
F_t	Valor calculado
n_o	Número de observações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Justificativa	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Concreto reforçado com fibras	20
2.1.1	Concreto reforçado com fibras sintéticas	23
2.1.2	Volume de fibras	25
2.1.3	Propriedades geométricas das fibras	27
2.1.4	Comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras	29
<u>2.1.4.1</u>	<u>Resistência à compressão</u>	<u>29</u>
<u>2.1.4.2</u>	<u>Resistência à tração</u>	<u>30</u>
<u>2.1.4.3</u>	<u>Módulo de elasticidade</u>	<u>31</u>
2.1.5	Tenacidade	32
2.2	Esforços cisalhantes no concreto	33
2.2.1	Efeito de pino	35
2.2.2	Teoria Atrito-Cisalhamento	35
2.2.3	Recomendações normativas que consideram a teoria atrito-cisalhamento 40	
2.2.4	Ensaio de cisalhamento direto do tipo <i>push-off</i>	41
2.2.5	Influência das fibras na resistência ao cisalhamento do concreto	45
2.2.6	Estado da arte	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	Classificação e posicionamento da pesquisa	50
3.2	Principais etapas da pesquisa	50
3.3	Descrição das etapas	52
3.3.1	Materiais	52
<u>3.3.1.1</u>	<u>Fibra sintética</u>	<u>52</u>
3.3.2	Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova	53
<u>3.3.2.1</u>	<u>Resistência à tração na flexão</u>	<u>54</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>Ensaio de <i>push-off</i>: corpos de prova e instrumentação</u>	<u>54</u>
3.3.3	Análise dos resultados	59

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Resistência à compressão	61
4.2	Resistência à tração na flexão	62
4.3	Resistência ao cisalhamento direto.....	65
4.3.1	Abertura de fissuras	66
4.3.2	Estimativas teóricas.....	71
4.3.3	Tensão de cisalhamento normalizada	74
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS.....	78
	APÊNDICE A - Curvas granulométricas dos agregados.....	85

1 INTRODUÇÃO

No estado endurecido o concreto simples apresenta pequena capacidade de deformação antes da ruptura, comportando-se como material frágil. Além do exposto, possui resistência à tração consideravelmente inferior à sua resistência à compressão (Mehta; Monteiro, 2014). Esse comportamento do concreto associa-se às fissuras e microfissuras que se formam, ou já pré-existentes no concreto quando o material é submetido à tração. Tais limitações podem ser atenuadas, ou até mesmo solucionadas, por meio da adição de fibras à sua mistura (Figueiredo, 2011).

Além de servirem como alternativa para melhorar a resistência à tração do concreto, as fibras promovem resistência residual ao concreto mesmo após o início de sua fissuração – propriedades de pós-fissuração – e auxiliam no aprimoramento de outras propriedades mecânicas do concreto em seu estado endurecido. Entre tais propriedades, pode-se citar a tenacidade, a ductilidade e as resistências à flexão, ao impacto e à fadiga (Lantsoght, 2019; Rauecker et al., 2019; Zhang; Han; Hua, 2018).

As fibras podem ser produzidas a partir de diversos materiais como aço, vidro, carbono e polímeros e cada uma auxilia no desempenho do concreto de maneira diferente. Geralmente, as fibras de aço são aplicadas a finalidades estruturais e fibras sintéticas, a finalidades não estruturais (ACI, 2018; Bentur; Mindess, 1990). Devido ao grande potencial de aplicação do concreto reforçado com fibras (CRF), em 2021, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a norma ABNT NBR 16935 (ABNT, 2021), onde é corroborado o fato de que as fibras melhoram o comportamento do concreto.

Apesar da ampla utilização de fibras de aço como reforço estrutural do concreto, a necessidade de procurar fibras de materiais alternativos. Uma vez que o aço apresenta natureza corrosiva e custo elevado, as fibras sintéticas passaram a ser uma alternativa interessante (Li; Wu; Liu, 2018). Estudos realizados por Alani e Beckett (2013), Alhassan *et al.* (2022), Karim e Shafei (2022), Kobayashi e Cho (1982), Salvador e Figueiredo (2013) e Zheng e Feldman (1995) mostraram que as fibras sintéticas também podem ser utilizadas para reforço estrutural de elementos de concreto, o que permite adotá-las como material substituto para as fibras de aço. Tal premissa torna-se verdadeira quando realizados estudos de dosagem para determinar o teor de material com equivalência de desempenho (Salvador; Figueiredo, 2013).

Em algumas situações, o congestionamento de armadura, devido à grande quantidade de estribos, dificulta o correto lançamento do concreto. Nessas ocasiões, a adição de fibras pode melhorar a resistência ao cisalhamento e reduzir ou eliminar a necessidade de estribos, tornando essa uma das aplicações de maior interesse nos últimos tempos (Lantsoght, 2019). Assim, faz-se possível avaliar a utilização da armadura de cisalhamento mínima, requerida por normativas, combinada com a adição de fibras, ou até mesmo analisar a possibilidade de substituição dessa armadura mínima pelas fibras.

Geralmente, as propriedades mecânicas do CRF são obtidas por meio de ensaios de flexão, como sugerem as recomendações normativas (ACI, 2019; ABNT, 2021; Blanco et al., 2017; FIB, 2010; Soetens; Matthys, 2017). No entanto, em peças com descontinuidades geométricas, como vigas pré-moldadas e consolos, submetidas a esforços puramente cortantes, a ruptura do elemento se dá a partir de fissuras perpendiculares à linha neutra, de forma que não haja flexão no elemento (French *et al.*, 2017).

Estudos apontaram que a resistência ao cisalhamento do CRF calculada a partir das instruções normativas difere dos valores obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto (Alberti *et al.*, 2020; Picazo *et al.*, 2018). Dessa maneira, a análise de elementos sujeitos a cisalhamento puro seria mais apropriada por meio da realização ensaios de cisalhamento direto, também denominados de *push-off*.

O ensaio de *push-off* é bastante utilizado para entender melhor o comportamento do concreto sujeito a esforços cortantes, bem como os mecanismos que auxiliam no desempenho da estrutura, como o engrenamento de agregados, que auxilia a resistência do elemento estrutural por meio de atrito entre a interface das fissuras (Ahmed; Ansell, 2010; Araújo; Lobo; Martins, 2021; Banthia et al., 2014; Cuenca; Serna, 2010; Picazo et al., 2021; Soetens; Matthys, 2017). Embora não seja normalizado, as vantagens de se realizar este ensaio englobam as dimensões reduzidas de amostras e a possibilidade de utilizar prensas mecânicas, o que é favorável em ocasiões que necessitem de um grupo amostral extenso (Savaris, 2016).

A partir do exposto, foi idealizado um programa experimental com a finalidade de avaliar a resistência ao cisalhamento direto de concretos com adição de macro fibras sintéticas, o que avança no entendimento da influência dessas fibras tanto com relação à capacidade de carga dos elementos estudados, como no comportamento

de pós-fissuração. Esta análise se deu por meio da realização de ensaios de cisalhamento direto (*push-off*), variando-se o volume de fibras adicionado à mistura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito da adição de macro fibras de polietileno na resistência ao cisalhamento direto do concreto, por meio do ensaio de *push-off*.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar o efeito de diferentes percentuais de adição de fibras na trabalhabilidade do concreto no estado fresco;
- Avaliar o efeito de diferentes percentuais de adição de fibras nas resistências à compressão axial, à tração na flexão e ao cisalhamento direto do concreto reforçado com macro fibras sintéticas;
- Avaliar as equações propostas na literatura e em normativas para estimativa da resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com macro fibras sintéticas;
- Verificar a possibilidade de substituição da armadura transversal mínima em elementos de concreto reforçado por macro fibras sintéticas.

1.2 Justificativa

Internacionalmente, o concreto reforçado com fibras já é bastante utilizado, com diversos estudos e normas sobre o tema. No Brasil, em 2021, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou as normas ABNT NBR 16935, 16939, 16940 e 16942 (ABNT, 2021), para auxiliar projetistas e executores quanto as propriedades e controle de qualidade do CRF. Contudo, ainda há uma carência de pesquisas e normas que relacionem os materiais do compósito, englobando o uso de fibras sintéticas, especialmente macro fibras de polietileno, para reforços estruturais e as restrições quanto a sua aplicação. Uma vez que fibras desse material são estudadas

apenas com hibridização de fibras ou como reforço não estrutural, na forma de microfibras.

Apesar de fibras de aço já serem aplicadas como reforço estrutural no concreto, devido ao seu alto custo e à sua natureza corrosiva, faz-se necessário analisar outros materiais que auxiliem no desempenho do concreto, como fibras sintéticas (Ortiz Navas *et al.*, 2018). De acordo com Salvador e Figueiredo (2013), se realizado o estudo de teor para desempenho equivalente, em elevados níveis de deformação, a carga resistida pelo concreto reforçado com fibras de aço pode ser superada pela resistência do concreto reforçado com fibras poliméricas.

Além disso, Karim e Shafei (2022) notaram que as fibras sintéticas (polipropileno e polivinil-álcool) forneceram auxílio na conservação da resistência residual do concreto, principalmente em avançado estado de fissuração, o que auxilia na durabilidade da estrutura, por serem capazes de reter melhor o desenvolvimento de fissuras. Ademais, de acordo com Ortiz Navas *et al.* (2018), ainda são poucos os estudos experimentais que avaliam a resistência ao cisalhamento do concreto na presença de macro fibras sintéticas.

Por fim, embora os ensaios de flexão sejam amplamente utilizados para o dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras, seus resultados podem não fornecer dados suficientes para avaliar o comportamento do concreto submetido ao cisalhamento puro. A distribuição de tensões e a influência das fibras diferem entre esforços de flexão e de cisalhamento. Dessa forma, são necessários estudos que compreendam ensaios de cisalhamento direto (Banthia *et al.*, 2014; Blanco *et al.*, 2017; Picazo *et al.*, 2021).

Demonstra-se assim, a necessidade de estudos relacionados à avaliação da resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com macro fibras sintéticas, especialmente as de polietileno.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi separada em duas seções: concreto reforçado com fibras e mecanismos de resistência ao cisalhamento. Na primeira seção, levou-se em consideração o compósito, as propriedades das fibras e sua influência na resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e tenacidade de estruturas de concreto reforçado com fibras. Na segunda seção, foram abordados os mecanismos de resistência ao cisalhamento de uma estrutura e o método de ensaio do tipo *push-off* para a avaliação do cisalhamento direto. Por fim, foi realizado um estudo da arte a respeito do tema em questão.

2.1 Concreto reforçado com fibras

A incorporação de fibras ao concreto tem se destacado devido à sua influência positiva nas propriedades intrínsecas, relacionadas à ductilidade e resistência à tração do concreto. Há aproximadamente 3.500 anos, materiais como crina de cavalo, palha e outras fibras naturais eram utilizadas para reforçar blocos de argila (Brandt, 2008). De acordo com Bentur e Mindess (1990), o primeiro compósito amplamente utilizado foi desenvolvido em 1900, onde reforçava-se cimento com amianto, a fim de se produzir materiais a serem utilizados em coberturas e tubulações. Existem fibras de diversos materiais que podem ser utilizados como reforço para compósitos cimentícios, como fibras de aço, vidro, carbono, sintéticas (polipropileno e nylon) e naturais (celulose e sisal). Essas fibras variam tanto com relação ao custo como a propriedades geométricas e mecânicas (Jen; Trono; Ostertag, 2016; Rambo; Silva; Filho, 2014).

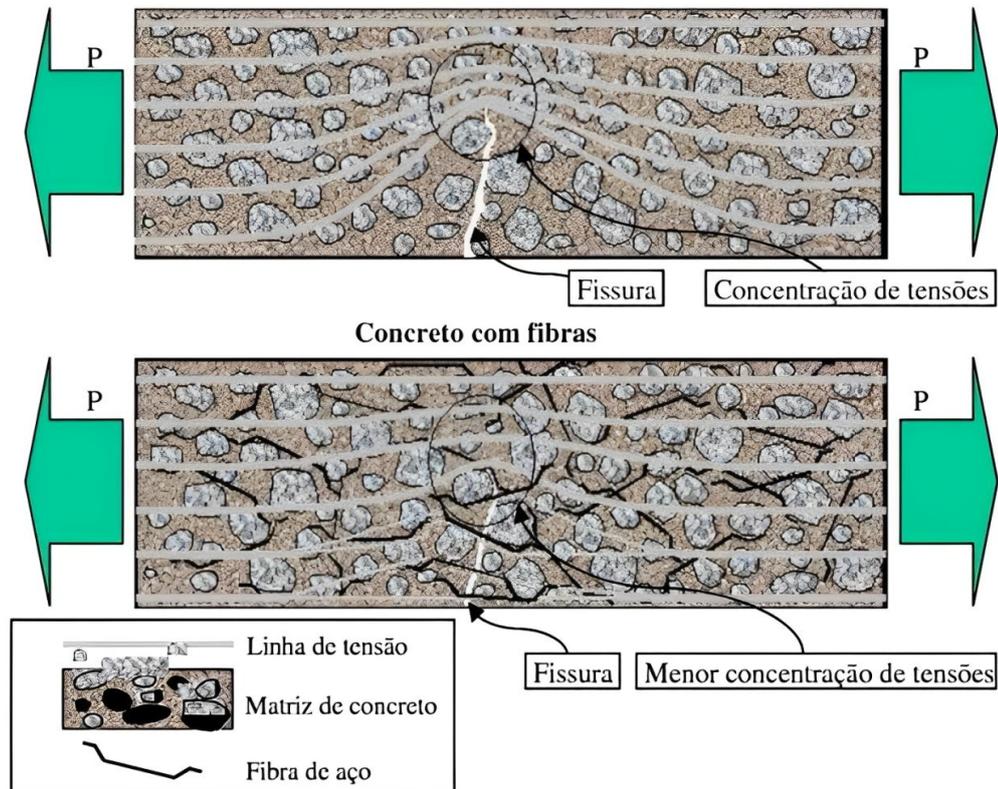
No concreto, as primeiras fibras utilizadas como reforço estrutural foram as de aço e vidro, entre os anos de 1950 e 1960, que em termos geométricos, eram lisas e retas. Atualmente, fibras de diversas geometrias foram desenvolvidas a fim de modificar sua ancoragem mecânica com a matriz cimentícia (Bentur; Mindess, 1990; Brandt, 2008). O estudo realizado por Ahmad e Zhou (2022), Borges, Motta e Pinto (2019) e por Wang et al. (2023), por exemplo, analisou a adição de fibras vegetais – sisal e rami – e de polipropileno ao concreto para aplicação em paredes estruturais, o que comprova a variedade de materiais que têm sido pesquisados para utilização como reforço.

Uma das principais razões de se reforçar o concreto é o fato de que materiais cimentícios são caracterizados por sua baixa resistência à tração e pouca capacidade de deformação, ou seja, apresentam modo de ruptura do tipo frágil, ou semi-frágil. Historicamente, barras de aço têm sido aplicadas para reforçar estruturas de concreto, porém, em algumas situações, a utilização de barras de aço, pode ser desfavorável economicamente, como em ocasiões que favorecem o congestionamento de armaduras, devido à alta taxa de armadura necessária. Nesses casos, devido à descontinuidade das fibras, é possível distribuí-las aleatoriamente na matriz cimentícia, o que pode ser vantajoso às estruturas (Bentur; Mindess, 1990; Brandt, 2008; Lantsoght, 2019).

Além do auxílio na resistência à tração e na ductilidade, as fibras proporcionam meios de absorção de energia, fazendo com que sua adição na mistura do concreto permita uma origem mais tardia de fissuras e um atraso na falha do elemento estrutural, ou seja, otimiza as interações fibra-trinca. Ademais, de acordo com sua disposição no elemento estrutural, as fibras podem auxiliar no controle e no retardamento da propagação de fissuras presentes na zona de fissuração, ou podem ajudar no fornecimento de caminhos de transferência de esforços, impedindo o aumento das fissuras quando incorporadas nas falhas (Bentur; Mindess, 1990; Jen; Trono; Ostertag, 2016; Lantsoght, 2019).

Os trabalhos de Alhassan et al. (2022) e de Barros e Figueiras (1999) comprovam o comportamento das fibras na fissuração, onde, devido ao efeito de ponte através das fissuras, as fibras conseguiram transferir as tensões entre as superfícies fissuradas, o que evitou a concentração de tensões nessa região, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação da concentração de tensões no concreto (a) sem e (b) com fibras



Fonte: Figueiredo (2000)

As fibras geralmente apresentam desempenho superior ao das barras de aço em situações em que não é possível utilizar armadura convencional, como componentes laminados, ou em estruturas que devem suportar altos carregamentos pontuais, como guarnições e túneis, elementos resistentes à explosão e estacas pré-moldadas cravadas ao solo. Além disso, as fibras podem ser empregadas como reforço secundário, em lajes e pavimentos, que sofrem fissuração devido a variações de umidade ou temperatura (Bentur; Mindess, 1990).

De acordo com Bentur e Mindess (1990), como as fibras reduzem consideravelmente a trabalhabilidade do concreto, seu volume adicionado deve ser inferior a 2%. Brandt (2008) comenta que a garantia da correta distribuição das fibras torna-se mais difícil conforme o aumento do volume de fibras e que esse aspecto deve ser sempre levado em consideração. De acordo com Alani e Beckett (2013), para evitar a aglutinação de fibras é necessário adicioná-las a mistura em uma taxa lenta e de maneira intervalada com o misturador ainda em movimento. Essas considerações são também levadas em conta em estudos mais recentes (Ahmad; Zhou, 2022; Ghali et al., 2023).

2.1.1 Concreto reforçado com fibras sintéticas

Em função do custo elevado das fibras de aço, bem como de sua natureza corrosiva, desde a década de 1970, fibras sintéticas têm sido estudadas como substitutas do aço para aplicação estrutural em concreto (Li; Wu; Liu, 2018). Fibras sintéticas podem ser caracterizadas como flexíveis, de corpo macroscopicamente homogêneo com uma alta razão entre comprimento e largura e com baixa seção transversal. Essas fibras são compostas por macromoléculas naturais e polímeros sintéticos, em que a organização das cadeias poliméricas no espaço tridimensional é responsável por determinar as propriedades químicas, físicas e mecânicas (Zheng; Feldman, 1995).

De acordo com a norma americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D7508/D7508M-10 (ASTM, 2015), macro fibras apresentam diâmetro entre 0,3 e 1,0 mm e comprimento entre 12 e 65 mm, e podem ser configuradas como fios ou filamentos de fita, que podem ser torcidos ou estampados. Sua ancoragem ao concreto é feita principalmente por atrito e a resistência à tração mínima deve ser de 345 MPa.

Segundo Salvador e Figueiredo (2013), para altos valores de deformação, a carga resistida pelo concreto reforçado com fibras de aço pode ser superada pela resistência do concreto reforçado com fibras poliméricas, desde que seja realizado um estudo de dosagem para desempenho equivalente.

Para melhorar a resistência de seus compósitos, as fibras devem apresentar módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia. Entretanto, pesquisas teóricas e experimentais demonstraram que, apesar dos baixos módulos de elasticidade, as fibras sintéticas podem gerar bons resultados com relação à capacidade de deformação, tenacidade, resistência ao impacto e controle de fissuras. Em algumas aplicações, a baixa resistência à tração do concreto pode ser melhorada com a adição de fibras com pequenos diâmetros (Zheng; Feldman, 1995).

De acordo com Brandt (2008), as fibras de polivinil álcool (PVA) e de polipropileno com comprimento entre 10 e 80 milímetros (mm) e diâmetro entre 0,50 e 1,50 mm são aplicadas em volume de 0,5% a 2% para melhorar a tenacidade, resistência ao impacto e à fadiga de concretos estruturais. Já as fibras de polipropileno de baixo módulo apresentam duas aplicações principais: a primeira diz respeito ao controle de fissura de retração do concreto novo, onde o módulo de elasticidade do

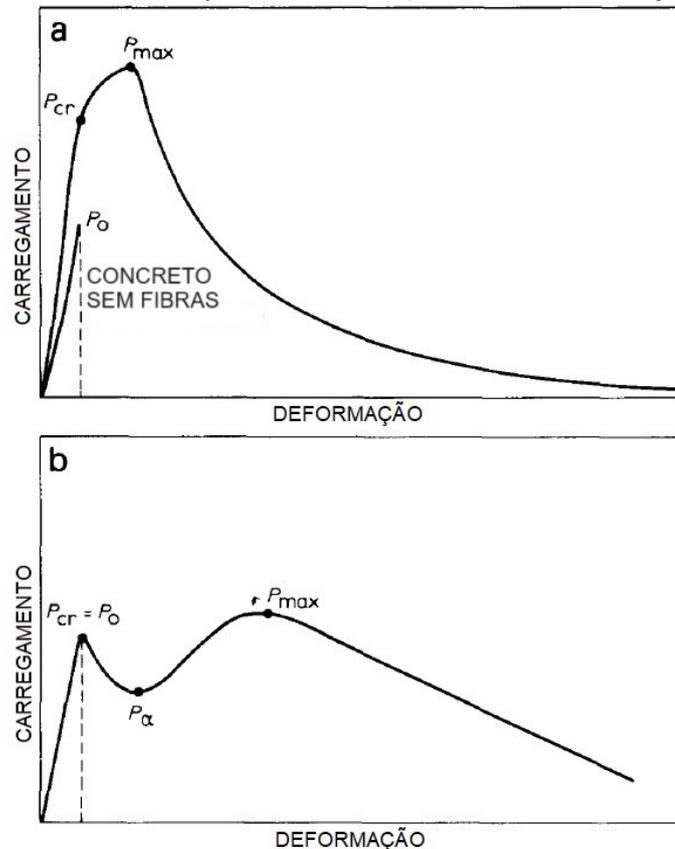
concreto é parecido com o das fibras, e a segunda aplicação ocorre em paredes de concreto, pois derretem em altas temperaturas e criam canais que aliviam as pressões internas e auxiliam a retardar a ruptura do concreto, quando sujeito a incêndio, por exemplo.

As macro fibras de polipropileno vêm ganhando atenção como reforços de elementos estruturais devido à sua alta resistência à corrosão e a possibilidade de melhorar significativamente o comportamento mecânico de estruturas de concreto (Ding et al., 2016; Zhang; Han; Hua, 2018). Sob o mesmo viés, as fibras de polietileno podem auxiliar na melhoria da tenacidade e nas características do concreto quanto à flexão.

Kobayashi e Cho (1982) elaboraram um estudo experimental com a finalidade de avaliar as características do concreto reforçado com fibras de aço e de polietileno, por meio de ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos. O intuito dos autores foi analisar a hibridização de fibras de aço e de polietileno. Para tanto, além do concreto com reforço híbrido, foram ensaiadas misturas com apenas fibras de aço, apenas fibras sintéticas e sem adição de fibras. Dessa forma, foi possível compreender como as fibras se comportam separadamente e de que forma elas influenciam o concreto.

Ao realizar ensaios de flexão com adição de apenas um tipo de fibra, aço ou polietileno (Figura 2), Kobayashi e Cho (1982) notaram que, ao comparar as situações “a” e “b”, percebeu-se que o aço (situação “a”) ajudou, principalmente, na resistência referente ao estado limite de serviço (P_{cr}). Porém, a falha ocorreu devido a saída de fibras da matriz após atingir o carregamento máximo ($P_{máx}$), o que acarretou uma queda brusca da resistência do concreto, apesar de haver melhoria na tenacidade. Já o polietileno (situação “b”), inicialmente não fornece uma melhoria com relação ao estado limite de serviço. Contudo, após o início da fissuração, a tensão é resistida apenas pelas fibras, de maneira que seja garantida uma elevada resistência, mesmo com altos valores de deformação.

Figura 2 – Curvas esquemáticas de carregamento vs. deformação para a) concreto reforçado com fibras de aço e b) concreto reforçado com fibras de polietileno

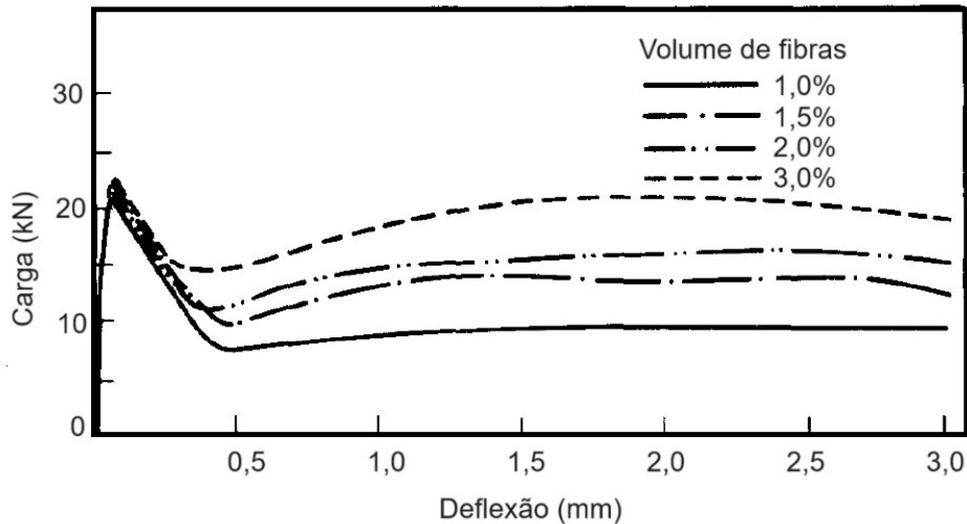


Fonte: Adaptado de Kobayashi e Cho (1982)

2.1.2 Volume de fibras

Conforme o volume de fibras é aumentado, maior é o número de fibras que interceptam uma fissura, dessa forma atuam como ponte de transferência de tensão e melhoram o comportamento pós-fissuração do concreto (Alhassan *et al.*, 2022; Tiberti *et al.*, 2018; Uygunoğlu, 2008). É possível observar nos resultados de ensaio de tração no concreto, apresentados na Figura 3, que há um comportamento pós-fissuração devido à adição de fibras, no qual a resistência residual aumenta como aumento do teor de fibras.

Figura 3 – Curvas de carga x deflexão com diferentes volumes de fibra de polietileno

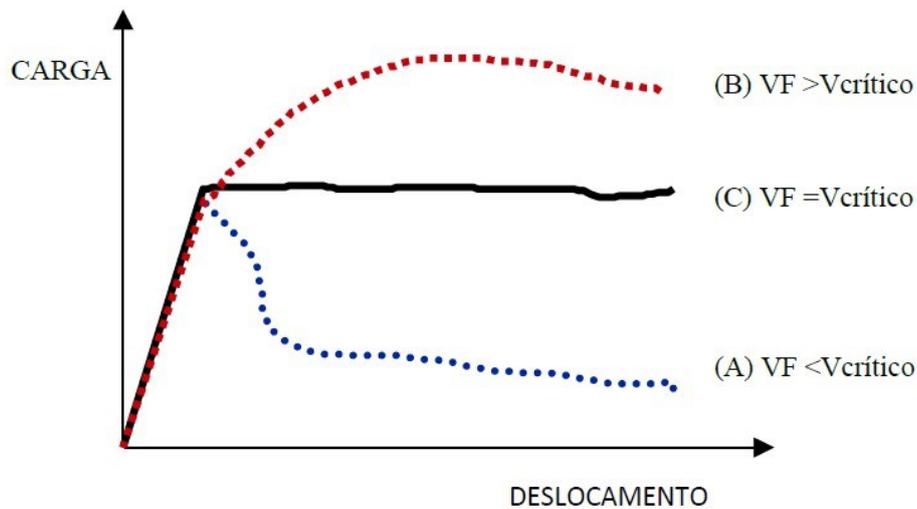


Fonte: Adaptado de Kobayashi e Cho (1982)

Camille et al. (2021) observaram um decréscimo de, aproximadamente, 12% na resistência à compressão de concretos com adição de macro fibras sintéticas, para volumes de fibras superiores a 1,5%, enquanto para a resistência à tração, ocorreu um aumento na resistência de até 83%, com a adição de fibras em até 2%. Os autores notaram que até o volume de 1%, houve distribuição homogênea de resistência de esforços tanto da parte das fibras como da matriz cimentícia. Quando o teor de fibras era superior a 1%, a resistência do material passou a depender predominantemente do acréscimo das fibras, que iniciaram a formação de pontes de transferências de tensões.

De acordo com Figueiredo (2011), há um volume crítico de fibras, correspondente ao teor de fibras que preserva a mesma resistência para o compósito a partir da falha da matriz. Isto é, abaixo do volume crítico ocorre uma perda da capacidade resistente após a fissuração da matriz – *strain-softening* – e acima do volume crítico o compósito continua com o aumento da capacidade resistente mesmo após a matriz fissurada – *strain-hardening*. Esse comportamento é representado na Figura 4, onde, após a fase linear-elástica inicial há um trecho parecido com o patamar de escoamento, em que pode ser observada a influência do teor de fibras no concreto.

Figura 4 – Influência do volume crítico de fibras à mistura do concreto, durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo (2000)

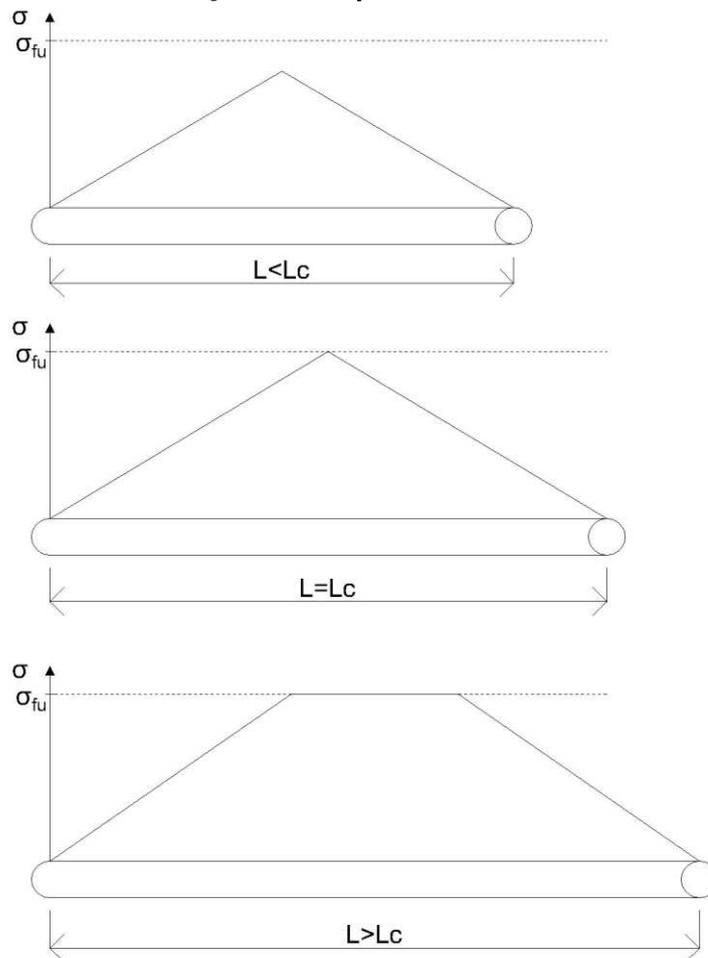
Resultados obtidos por Rambo, Silva e Filho (2014) demonstraram que as fibras forneceram um acréscimo de resistência após o início da fissuração (*hardening*). Para pequenos deslocamentos, de 0,2 mm, a hibridização de fibras de aço mostrou-se mais eficiente na capacidade de absorção de energia do que a utilização de um único tipo de fibra. Para 1% de teor de fibras, a hibridização garantiu uma tenacidade de 6,72 N.m e a não hibridização resultou em 5,61 N.m. Contudo, para altos níveis de deslocamento, a utilização de apenas um modelo de fibras garantiu um melhor resultado.

2.1.3 Propriedades geométricas das fibras

Outros fatores como geometria e comprimento (L) das fibras também precisam ser avaliados na dosagem do concreto. Segundo Bentur e Mindess (1990), fibras mais compridas e de menor diâmetro são mais eficientes no CRF endurecido, porém dificultam a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. A fim de suprir esta dificuldade pode-se alterar a geometria da fibra – corrugadas, onduladas, de maior ou menor diâmetro. Também é possível tratar quimicamente a superfície das fibras para que melhore sua dispersão no concreto, deixando-as menos aderentes, utilizar aditivos no concreto, como redutores de água ou cinzas volantes, ou adotar técnicas de produção que garantam a dispersão do volume suficiente de fibras na mistura do concreto.

Um conceito importante é o comprimento crítico (L_c), o qual Figueiredo (2011) descreve como o comprimento de fibra que proporciona uma tensão no seu centro igual à tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz, quando uma fissura se desenvolve perpendicularmente à fibra. Possíveis distribuições de tensão na fibra em relação ao seu comprimento crítico estão dispostas na Figura 5.

Figura 5 – Possíveis distribuições de tensão ao longo do comprimento de uma fibra, em função do comprimento crítico



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (1990)

Quando a fibra apresenta um comprimento inferior ao crítico, a carga de arrancamento devido ao comprimento embutido na matriz não é suficiente para gerar uma tensão superior à da resistência da fibra. Dessa maneira, ao aumentar a deformação e a abertura de fissura, a fibra responsável pela transferência de tensões pela fissura será arrancada do lado com menor comprimento embutido. Já em situações em que o comprimento da fibra é igual ou superior ao comprimento crítico, pode-se gerar uma tensão de tração igual à resistência da fibra. Por fim, quando o

comprimento da fibra é superior ao comprimento crítico, a falha do compósito ocorrerá majoritariamente pela ruptura da fibra (Figueiredo, 2011)

Contudo, de acordo com o mesmo autor, nem sempre um maior comprimento de fibra resulta em um maior embutimento, com maior resistência pós-fissuração. Elevados comprimentos de fibra podem dificultar sua mistura ao concreto. Outra inconveniência de se ultrapassar o comprimento crítico é o rompimento da fibra com formação da fissura, o que reduz a resistência residual.

2.1.4 Comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras

2.1.4.1 Resistência à compressão

De acordo com a *American Concrete Institute* (ACI) ACI 544.4R-18 (ACI, 2018), a influência das fibras na resistência à compressão do concreto diz respeito ao aumento da tenacidade, devido à absorção de energia durante a deformação do material, que pode ser adequada para prevenir rupturas bruscas da estrutura. Com relação aos resultados de tensão, pode-se dizer que a resistência à compressão é praticamente independente do volume de fibras utilizado, uma vez que a variação entre resultados é baixa (Salvador; Figueiredo, 2013). Bentur e Mindess (1990), constataram que a adição de fibras pode ser considerada irrelevante para a resistência à compressão do concreto, por produzirem pouco ou nenhum aumento em seus resultados.

Similarmente, Camille *et al.* (2021) notaram que apesar das fibras possuírem boa ancoragem na matriz, o que reduziu a propagação de fissuras e a rigidez do modo de ruptura, a adição de fibras não apresentou influência significativa na resistência à compressão do material. Sob o mesmo prisma, Bosnjak, Sharma e Grauf (2019) concluíram em seus estudos que tanto as fibras de aço, como microfibras de polipropileno não afetaram significativamente a resistência a compressão do concreto reforçado com fibras.

A utilização de fibras sintéticas com comprimentos 54 e 36 mm foi avaliada em concretos compactados a rolo por Ozturk, Atahan e Ozyurt (2022). Os autores verificaram que os valores de resistência à compressão sofreram pouca alteração entre o concreto de referência e a adição das fibras de 54 mm – sendo 40,7 MPa e 39,4 MPa, respectivamente. Já para as fibras de menor comprimento, houve uma redução da resistência à compressão para 37,3 MPa. Em outra pesquisa, a adição de

fibras de polietileno acarretou a redução da resistência à compressão do concreto devido ao aumento de vazios e da porosidade do compósito, que enfraqueceram a resistência interfacial entre a pasta cimentícia e os agregados (Yan *et al.*, 2023).

2.1.4.2 Resistência à tração

Sabe-se que o concreto convencional resiste consideravelmente menos a esforços de tração do que de compressão, geralmente em torno de 7 a 11% da resistência à compressão (Mehta; Monteiro, 2014). O concreto, quando submetido a esforços de tração, apresenta ruptura repentina, o que caracteriza o comportamento do material como frágil (Brandt, 2008) e, devido a isso barras de aço foram inseridas à sua mistura com o objetivo de melhorar sua resistência à tração. Com o mesmo objetivo, as fibras podem ser adicionadas à matriz cimentícia, pois possuem a habilidade de transferir tensões mesmo após atingir a resistência à tração do concreto e a fissuração da estrutura já estiver iniciado (Bentur; Mindess, 1990).

Segundo Lantsoght (2019), grande parte das pesquisas utiliza ensaio de flexão para determinar a resistência à tração do concreto com fibras, o que provavelmente se deve ao fato de que os ensaios de resistência à tração direta não são normalizados. De acordo com a norma americana ACI 544.4R-18 (ACI, 2018), a ausência de padronização com respeito à resistência à tração direta é justificada pelas diversas variáveis inerentes ao ensaio, como tamanho do corpo de prova, esmagamento do concreto, rigidez da prensa utilizada no ensaio, entre outros.

Apesar da maioria dos estudos preferirem ensaios indiretos, como teste de flexão, por exemplo, alguns ainda apresentam a análise de resistência à tração. Camargo (2021) utilizou proporções de teor de fibras de aço de 0,357%, 0,5% e 0,625%. A autora observou, em todos os casos, que as fibras melhoraram a resistência à tração do concreto em, aproximadamente, 16,15%, 33,36% e 20,28%, respectivamente.

Já Camille *et al.* (2021), também observaram melhoria da resistência à tração do CRF de 83%, para fibras de 48 mm de comprimento, e de 54%, para fibras de 58 mm, conforme o teor de fibras aumentou de 0,2% para 2,0%, em ambos os casos. Os autores perceberam que teores entre 0% e 1%, em volume, das duas fibras, performaram dentro da resistência limite prevista, onde houve contribuição igualitária entre as fibras e a matriz do concreto. Porém, para teores acima de 1%, o aumento

de resistência à tração ocorre devido a uma melhor ancoragem das fibras – efeito de ponte –, que reduz a propagação de fissuras e microfissuras.

2.1.4.3 Módulo de elasticidade

De acordo com Figueiredo (2011), o módulo de elasticidade correspondente ao concreto com fibras é uma combinação entre os módulos da matriz cimentícia e da fibra utilizada multiplicados pelos seus volumes. Nessa situação, o módulo de elasticidade do CRF depende muito mais da matriz, pois o volume de fibras normalmente é consideravelmente inferior ao de concreto.

As fibras podem ser divididas, de acordo com seu módulo de elasticidade. As de baixo módulo são aquelas que apresentam módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido – fibras de nylon e polipropileno, por exemplo – e as de alto módulo possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto endurecido – fibras de aço. Contudo, deve-se levar em consideração o fato de que, apesar de possuírem alto módulo de elasticidade, se as fibras apresentarem baixa resistência à tração, de nada adiantarão como contribuição no CRF, por terem pouca ou nenhuma capacidade de reforço pós-fissuração (Figueiredo, 2011; Quinino, 2015).

Rambo, Silva e Filho (2014), utilizaram teor de fibras de aço de 1% e 1,5%, em volume. Os autores encontraram valores de módulo de elasticidade próximo de 30 MPa para todas as misturas. Esse resultado confirmou o fato de a rigidez do compósito ter sido dominada pelas propriedades da matriz na fase linear-elástica inicial das curvas de tensão por deformação. Similarmente, Rauecker et al. (2019) perceberam que a adição de fibras de aço não alterou significativamente o módulo de elasticidade do concreto.

Badogiannis, Christidis e Tzanetatos (2019) estudaram a influência da adição de fibras de aço e de polipropileno, com teores de 0,5% e 1% no módulo de elasticidade do concreto leve. Para as fibras de aço, a alteração entre volume e comprimento das fibras resultou em aumento entre 1,11% e 7,52%. Já para as fibras sintéticas, a alteração do teor de fibras reduziu de 4,64% a 5,80% o módulo de elasticidade. Dessa forma, os autores concluíram que a interferência das fibras, independente do teor ou geometria, no módulo de elasticidade é insignificante, o que corrobora com os demais resultados apresentados.

2.1.5 Tenacidade

Para o CRF, a tenacidade pode ser definida como a energia absorvida, antes e após a fissuração da matriz, pelo compósito quando submetido a um carregamento onde as fibras passam a agir de maneira mais efetiva (Figueiredo, 2011). No Brasil, o método mais empregado para determinação da tenacidade era o teste proposto pela *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE-SF4, 1984). No entanto, este ensaio era realizado com a alteração dos parâmetros de medida do comportamento de pós-fissuração do concreto e a partir da flexão a quatro pontos de corpos de prova prismáticos.

Outros métodos para obtenção da tenacidade são propostos pela *American Society for Testing Materials* (ASTM C1399, 2015) e pela *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM TC 162, 2003). Existem ainda os ensaios de punção de placas e de tração na flexão com corpos de prova prismáticos, propostos pela EFNARC – *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* (EFNARC, 1996).

No ano de 2021, a Associação Brasileira de Normas Técnicas lançou a primeira edição da NBR 16940, que apresenta ensaios para determinação da resistência à tração na flexão de concretos reforçados com fibras. O ensaio é realizado a partir da flexão a três pontos de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2021).

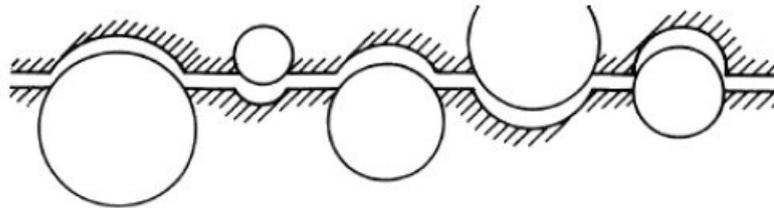
Badogiannis, Chistidis e Tzanetatos (2019) notaram que a tenacidade do concreto com fibras de aço melhora conforme o comprimento e o volume das fibras aumenta. Para o concreto de referência, os autores obtiveram uma tenacidade de 0,07 N.m, enquanto para a adição de fibras de aço foram observados valores de 13,13 N.m e 19,68 N.m, com fibras de 30 mm e volumes de 0,5% e 1%, respectivamente. Já para as fibras de 36 mm, os resultados foram 23,14 N.m e 40,45 N.m para volumes de 0,5% e 1%, respectivamente e, seguindo a mesma lógica, para fibras de 60 mm, obtiveram 29,89 N.m e 40,46 N.m. Para as fibras de polipropileno em teores de 0,5% e 1%, os resultados foram 5,81 N.m e 23,31 N.m, respectivamente.

Por fim, Ozturk, Atahan e Ozyurt (2022) utilizaram fibras sintéticas de 36 e 54 mm de comprimento em teor igual a 0,5%. Não houve variação na tenacidade dos concretos avaliados.

2.2 Esforços cisalhantes no concreto

O concreto pode ser considerado um sistema de duas fases, onde a primeira refere-se à matriz cimentícia, que engloba as partículas de agregados – segunda fase. Comumente, a rigidez e a resistência mecânica dos agregados são superiores às da matriz. Dessa forma, a zona de transição entre essas fases compreende a região crítica do sistema, pois a fissuração tende a se propagar por meio da matriz, circundando os agregados, conforme apresenta a Figura 6. A forma como as tensões de cisalhamento são transferidas entre interfaces do concreto apresenta uma certa complexidade e engloba fatores como resistência do concreto, taxa de armadura transversal, largura e abertura de fissuras e tensões normais e cisalhantes no plano cisalhado (Walraven; Frénay; Pruijsseres, 1987).

Figura 6 – Fissuração entre matriz e agregados



Fonte: Walraven, Frénay e Pruijsseres (1987)

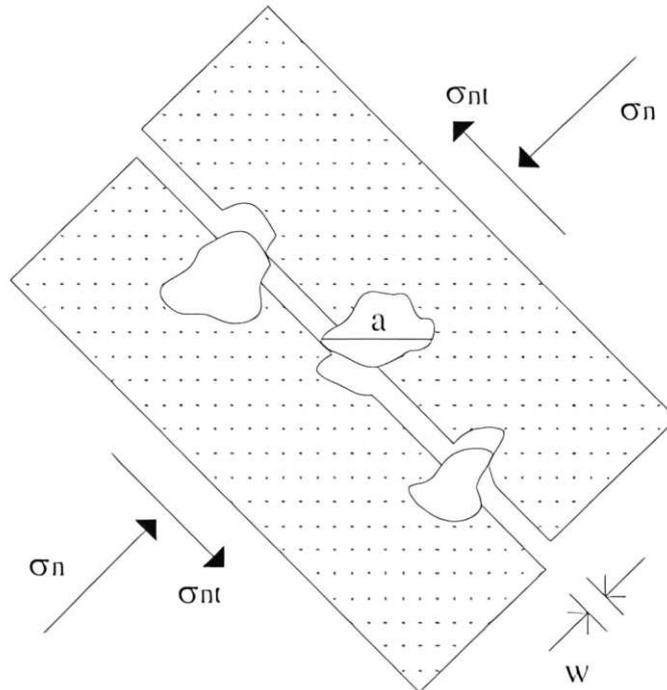
Coesão, ação mecânica e atrito são parâmetros responsáveis por transferir esforços cisalhantes pela superfície de contato. O primeiro mecanismo mobilizado a partir das tensões de cisalhamento é a coesão. Como pequenos deslocamentos são suficientes para afetar sua eficiência e a adesão entre as partículas internas do concreto resistem a pequenas solicitações, a coesão não garante uma transferência de esforços significativa (Araújo, 1997).

Quando não há mais adesão entre superfícies do plano de cisalhamento, caso existam tensões normais à interface, o atrito passa a ser um meio de transferir tensões. As tensões normais aparecem devido à armadura normal a superfície, quando tracionada, ou por meio da aplicação de carregamentos externos. De acordo com Santos e Júlio (2014), o atrito tem grande importância na transferência de tensões de cisalhamento, especialmente após o deslizamento entre superfícies, e a rugosidade da região influencia significativamente no desempenho da interface concreto-concreto.

A ação mecânica ocorre por meio do engrenamento mecânico entre duas superfícies de contato, resultando em “dentes de concreto” solicitados a esforços cisalhantes quando há deslizamento relativo entre as superfícies. Para regiões rugosas, esse mecanismo pode ser garantido pelo engrenamento de agregados em lados opostos da interface (Araújo, 1997).

O engrenamento de agregados ocorre quando as partículas sobressalentes da interface são maiores do que a largura da fissura formada, o que possibilita que a superfície fissurada forneça resistência ao escorregamento e a tensão cisalhante pode ser transferida. Esse mecanismo é demonstrado na Figura 7 – sendo w a largura da fissura, σ_n a tensão normal e σ_{nt} a tensão tangencial (Slobbe; Hendriks; Rots, 2012).

Figura 7 – Transferência de tensões cisalhantes pelo engrenamento de agregados



Fonte: Adaptado de Slobbe, Hendriks e Rots (2012)

Em razão de mecanismos de interação entre tensões normais e de cisalhamento, o engrenamento de agregados é um efeito de alta complexidade. Ao passo que as partículas de agregados deslizam umas sobre as outras, as fissuras também deslizam e tendem a se dilatar. Quando o alargamento das fissuras é restringido pelo reforço do concreto, tensões normais aparecem na superfície e, com o aumento da largura das fissuras, a resistência ao cisalhamento decai, devido à perda de contato entre as faces da fissura (Sagasetta; Vollum, 2011).

2.2.1 Efeito de pino

O deslizamento relativo entre interfaces de concreto se dá quando a região é submetida a esforços cisalhantes que tendem a “cortar” a armadura que atravessa a interface (Mattock, 2001). Segundo Araújo e El Debs (2001), a armadura transversal à superfície fissurada contribui por meio do efeito de pino e da tensão normal na interface, uma vez que ela melhora a resistência por atrito entre as regiões de contato. Tal tensão ocorre quando as partes da interface tendem a se afastar, por serem rugosas, e o deslizamento relativo tende a alongar a armadura.

De acordo com Lantsoght (2019), efeito de pino é a contribuição da armadura na resistência à abertura e escorregamento das trincas de cisalhamento. A ligação entre concreto e armadura e o cobrimento do concreto influenciam nesse mecanismo. Em situações de ausência de estribos, o cisalhamento máximo na armadura é limitado pela resistência à tração do cobrimento de concreto que suporta a armadura longitudinal. Quando a força de efeito de pino é significativa, a resistência à tração do cobrimento de concreto é atingida e então rompe por meio de divisão (Slobbe; Hendricks; Rots, 2012).

Como a tensão de cisalhamento depende de uma série de fatores, ela não pode ser considerada uniforme em materiais compósitos (Savaris; Pinto, 2021). Dessa forma, Walraven e Reinhardt (1981) sugeriram relacionar as resistências ao cisalhamento e à compressão, avaliando a tensão cisalhante normalizada, como mostra a Equação 1.

$$\tau_n = \frac{\tau_u}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (1)$$

Em que:

τ_n : Tensão de cisalhamento normalizada;

τ_u : Tensão de cisalhamento última;

f_{cm} : Resistência à compressão média.

2.2.2 Teoria Atrito-Cisalhamento

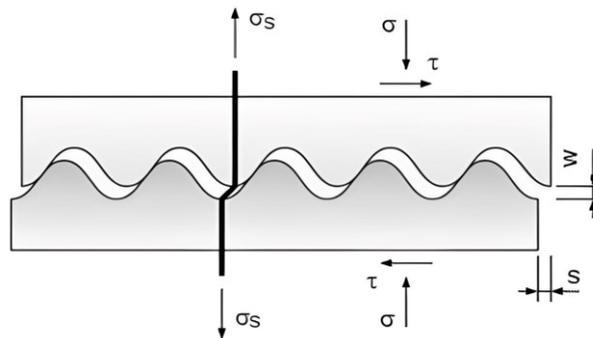
Entende-se por atrito-cisalhamento, um mecanismo de transferência de tensões ao longo da interface concreto-concreto, que está submetido a ações

simultâneas de cisalhamento e de compressão (Santos; Júlio, 2010). Esse campo de estudo tem sido pesquisado desde a década de 1960, fundamentado por teorias sobre o comportamento de elementos de concreto armado sujeitos a tensões de cisalhamento, especialmente em peças pré-moldadas.

Birkeland e Birkeland (1966) foram os precursores da teoria atrito-cisalhamento (*shear-friction*). Os pesquisadores objetivaram avaliar a resistência ao cisalhamento longitudinal entre duas regiões de concreto, que formam uma interface, por meio da transferência de esforços a partir do atrito gerado pela rugosidade das superfícies e pela taxa de armadura que atravessa o plano de cisalhamento.

Para o dimensionamento pela teoria atrito-cisalhamento considera-se que, devido o deslizamento relativo entre as interfaces concreto-concreto, as fissuras existentes tendem a se alargar, o que origina tensões de tração na armadura (σ_s) e de compressão na interface (σ). Ademais, as tensões cisalhantes (τ) atuantes na superfície, são transferidas por atrito apenas (Santos; Júlio, 2014). A Figura 8 representa, esquematicamente, o modelo da teoria atrito-cisalhamento.

Figura 8 – Representação do modelo atrito-cisalhamento



Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2014)

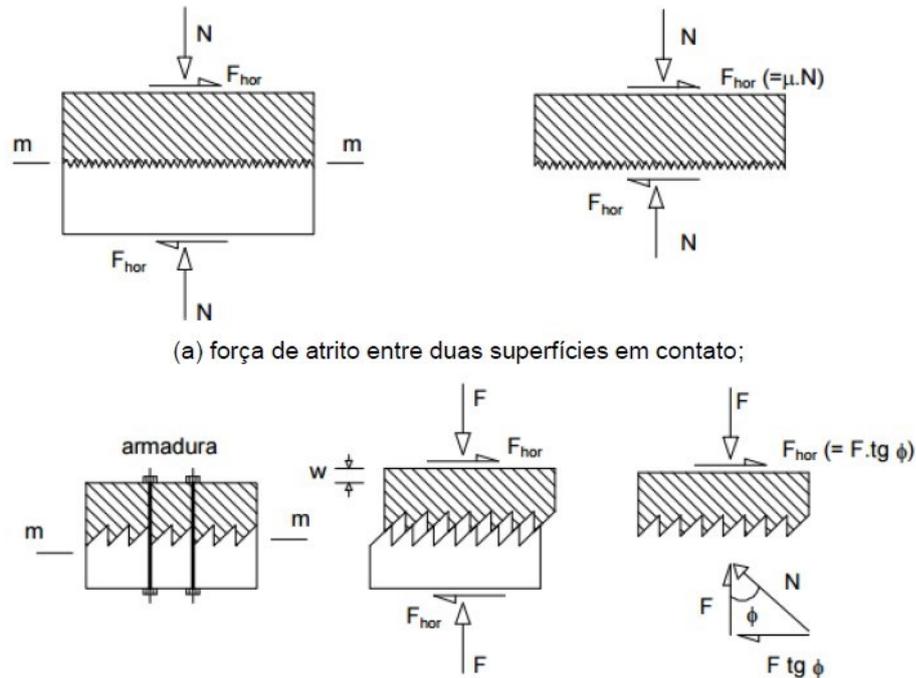
De acordo com Fonteboa et al. (2010), os principais fatores que influenciam a capacidade de atrito-cisalhamento são:

- Engrenamento de agregados e atrito: decorrente da rugosidade da superfície fissurada. Considera-se local, quando o comprimento do deslizamento é inferior à dimensão média do agregado, e global, quando é superior. Macroscopicamente, a largura da fissura, a rigidez da restrição lateral e a resistência do concreto influenciam o engrenamento de agregados. Microscopicamente, esse mecanismo é decorrente do contato entre os agregados graúdos em um lado da fissura e a argamassa no outro.

- Compressão aplicada normal à interface: auxilia no atrito e no engrenamento de agregados;
- Armadura que atravessa a interface: gera esforços de compressão na interface por causa do alongamento da armadura entre as fissuras. Importante também para o efeito de pino, graças à flexão e ao cisalhamento devido ao alargamento da fissura.
- Resistência à compressão do concreto: a transferência de esforços através das fissuras é perdida quando a interface perde contato. Essa perda ocorre pelo esmagamento dos agregados e da argamassa, quando a resistência última de ambos é atingida. A resistência a compressão do concreto se relaciona diretamente com a capacidade última que resulta no esmagamento, ou seja, influencia significativamente na transferência de tensões.

De acordo com Araújo (1997), a teoria atrito-cisalhamento recomenda considerar dentes de serra sem atrito com inclinação \emptyset , ao invés da interface rugosa. Ao utilizar uma força horizontal, uma face se desliza sobre a outra devido aos dentes de serra, além de haver separação entre as faces. Assim, tensões de tração são originadas na armadura transversal e a força F é aplicada à interface. Assim sendo, conforme a Figura 9, o equilíbrio das forças horizontais é atingido por meio da correlação representada pela Equação 2.

Figura 9 – Teoria atrito-cisalhamento



(a) força de atrito entre duas superfícies em contato;

Fonte: Araújo, 1997

$$F \cdot \text{tg} \phi = \mu \cdot N \quad (2)$$

A força F gera um efeito sobre a interface similar a uma força normal externa, de compressão, N . Isto posto, sabe-se que a tensão normal de compressão na interface é o produto entre a taxa de armadura e a resistência ao escoamento do aço ($\rho_w \cdot f_y$), supondo que a armadura transversal à interface atinja o escoamento f_y . A força cisalhante resulta na ruptura da interface e conduz a armadura ao escoamento. As Equações 3 e 4 apresentam o cálculo da resistência da interface, em que $\text{tg} \phi = \mu$ é o coeficiente de atrito, R é a força de cisalhamento resistente, ρ_y é a taxa geométrica de armadura transversal à interface e τ_u é a tensão de cisalhamento última resistente.

$$R = F \cdot \text{tg} \phi = A_{sw} \cdot f_y \cdot \text{tg} \phi \quad (3)$$

$$\tau_u = \rho_y \cdot f_y \cdot \text{tg} \phi \quad (4)$$

Birkeland e Birkeland (1966) recomendam que as equações descritas anteriormente sigam as seguintes condições de limitação:

- $\rho_y \leq 1,5\%$;
- $\tau_u \leq 5,52 \text{ MPa}$;
- $f_c \geq 27 \text{ MPa}$;
- $f_y \leq 414 \text{ MPa}$.

A característica da superfície da interface, seja artificialmente rugosa ou superfície aço-concreto, define o valor de coeficiente de atrito utilizado (Birkeland; Birkeland, 1966), assim sendo:

- $\mu = 0,8$ a $1,0$ – para superfícies lisas e interfaces concreto-aço;
- $\mu = 1,4$ – para superfícies artificialmente rugosas;
- $\mu = 1,7$ – para concreto monolítico.

A teoria atrito-cisalhamento foi aperfeiçoada por meio de estudos desenvolvidos por outros pesquisadores, como Mansur, Vinayagam e Tan (2008), Mast (1968), Mattock (1974) e Walraven (1980). Uma das principais contribuições para a teoria foi a incorporação do efeito da tensão normal externa (σ_n) e da parcela de coesão (c) sugerida por Mattock (1974), de acordo com a Equação 5.

$$\tau_u = c + (\rho_y \cdot f_y + \sigma_n) \cdot tg\phi \quad (5)$$

No decorrer dos anos, inúmeros estudos sobre esta área de pesquisa foram desenvolvidos, o que possibilitou o desenvolvimento de equações que estimassem a resistência ao cisalhamento entre interfaces de concreto. As equações dos principais estudos sobre a teoria atrito-cisalhamento estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações preditivas de resistência ao cisalhamento

(continua)

Autor	Equação proposta
Birkeland e Bikerland (1966)	$\tau_u = \rho_y f_y tg\phi$ $tg\phi$: 0,8 - 1,0 para juntas; 1,4 para rugosidade artificial e 1,7 para concreto monolítico
Loov e Patnaik (1994)	$\tau_u = k\lambda \sqrt{(0,1 + \rho_y f_y) f_c} < 0,25 f_c$ k : 0,6 para concreto monolítico e 0,5 para concreto moldado sobre concreto endurecido com superfície rugosa λ : considera efeito do agregado leve
Mattock (1974)	$\tau_u = 0,8 \frac{A_s}{A_c} f_y + K_1$ K_1 : 2,8 para concreto convencional; 1,7 para concreto com agregado miúdo leve e 1,5 para concreto leve

Tabela 2 – Equações preditivas de resistência ao cisalhamento
(conclusão)

Autor	Equação proposta
Mattock (1988)	$\tau_u = 0,467f_c^{0,545} + 0,8(\rho_y f_y + \sigma_n)$ σ_n : tensão normal externa ao plano da junta
Raths (1977)	$\tau_u = 3,11\lambda\sqrt{\rho_y f_y}$ λ : 1,0 para concreto convencional; 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve
Shainkh (1978)	$\tau_u = \lambda\sqrt{6,90\mu}\sqrt{\rho_y f_y}$ λ : 1,0 para concreto convencional; 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve μ : 1,4 para concreto monolítico; 1,0 para concreto moldado sobre concreto endurecido; 0,4 para juntas rugosas e 0,6 para concreto com armadura passante
Walraven, Frénay e Puijsseres (1987)	$\tau_u = 0,822f_{cc}^{0,406}(\rho_y f_y)^{0,159}f_{cc}^{0,303}$ f_{cc} : resistência à compressão de corpo de prova cúbico, de 150 mm de aresta ($f_{ck} = 0,85f_{cc}$)

Fonte: Adaptado de Fonteboa et al. (2010)

2.2.3 Recomendações normativas que consideram a teoria atrito-cisalhamento

Algumas normas de dimensionamento de estruturas de concreto armado contém equações para obtenção da resistência ao cisalhamento por atrito entre superfícies de fissuras de elementos concretados monoliticamente. A norma norte americana ACI 318 (ACI, 2019) sugere a Equação 6 para estimar a resistência ao cisalhamento em uma superfície fissurada ou não, considerando a existência de uma armadura transversal perpendicular ao plano de cisalhamento.

$$V_u = \mu A_{sw} f_y \quad (6)$$

Onde: μ refere-se ao coeficiente de atrito, A_{sw} é a área de armadura no plano de cisalhamento e f_y é a tensão de escoamento da armadura.

O coeficiente de atrito leva em consideração a condição da superfície de contato e o tipo de agregado empregado, que pode ser leve ou de peso específico normal, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 3 – Coeficientes de atrito

Condição da superfície	μ
Concreto aplicado monoliticamente	1,4 λ
Concreto aplicado sobre concreto endurecido e limpo, com superfície rugosa intencionalmente	1,0 λ
Concreto aplicado sobre concreto endurecido e limpo sem superfície rugosa intencionalmente	0,6 λ
Concreto aplicado sobre aço laminado e limpo com conectores metálicos	0,7 λ

Nota: $\lambda=1,0$ para concreto com agregado de peso específico normal, $\lambda=0,85$ para concreto com agregado graúdo leve e $\lambda=0,75$ para concreto com todos os agregados leves

Fonte: ACI 318 (ACI, 2019)

Já o *fib-Model Code* (FIB, 2010) apresenta equações para as tensões normais e de cisalhamento nas superfícies fissuradas. A tensão resistente de cisalhamento (τ) pode ser obtida por meio da Equação 7 e a tensão normal (σ), pela Equação 8. Ambas as equações dependem do deslocamento da fissura (δ), da largura da fissura (w) e da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto (f_c).

$$\tau = C_f \{-0,04f_c + [1,8w^{-0,8} + (0,292w^{-0,7} - 0,25)f_c]\delta\} \quad (7)$$

$$\sigma = C_f \{-0,06f_c + [1,35w^{-0,63} + (0,242w^{-0,55} - 0,19)f_c]\delta\} \quad (8)$$

O termo C_f é um fator que representa a efetividade do agregado. Quando o agregado não rompe após a fissuração do concreto, considera-se 1,0. Para agregados de baixa resistência, ou concretos de alta resistência, em que a maioria das partículas rompem, utiliza-se o valor de 0,35. Para obter resultados mais precisos do fator de efetividade do agregado, a normativa sugere realizar testes de *push-off*.

2.2.4 Ensaio de cisalhamento direto do tipo *push-off*

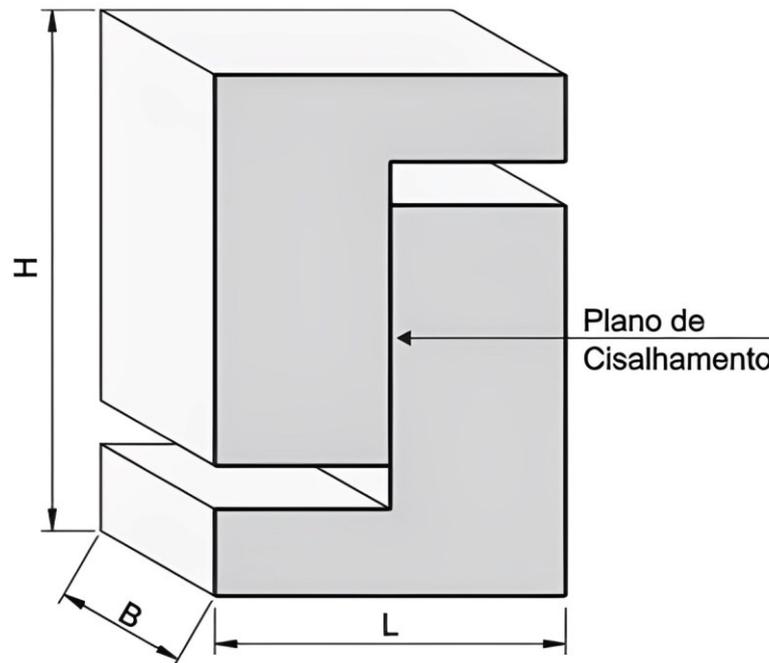
Inúmeros estudos foram realizados com o intuito de avaliar a resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto (Banthia et al., 2014; French et al., 2017; Savaris; Pinto, 2021; Torres, 2019; Walraven; Reinhardt, 1981). Nas pesquisas iniciais, geralmente utilizava-se ensaios em vigas bi apoiadas e ensaios de cisalhamento direto. Na literatura internacional, ensaios de cisalhamento direto são denominados *push-off*, que são adotados, geralmente, para avaliar a resistência da junção de interfaces concreto-concreto quando a armadura de aço que atravessa a interface é levada em consideração (Araújo, 1997; Santos, 2009). Além disso, de acordo com Savaris (2016), estes ensaios possibilitam determinar a transferência de

tensões cisalhantes por atrito entre as superfícies fissuradas, ou seja, avaliar o engrenamento de agregados, conforme apresentado em 2.2.2.

O corpo de prova para ensaios de *push-off* é composto por duas peças de concreto, em forma de “L”, conectadas pela interface, com abertura em suas extremidades (Torres, 2019). Como o ensaio de *push-off* é realizado por meio de carregamento vertical, as amostras devem conter armadura de montagem a fim de que os esforços de flexão sejam minimizados. O carregamento é aplicado até a falha da amostra, por meio da separação do plano de cisalhamento e do rompimento das barras de aço que o atravessam (Savaris, 2016). Para garantir a falha no plano de cisalhamento, é possível reduzir a seção transversal da peça. Essa redução pode ocorrer no momento da montagem das formas, ao prender filetes de madeira nas regiões a serem reduzidas, ou após desformar os corpos de prova, com o auxílio de uma serra.

O ensaio de *push-off* é amplamente utilizado devido às dimensões reduzidas das amostras e à possibilidade de utilizar prensas mecânicas (Savaris, 2016). Isto posto, é possível moldar a quantidade necessária de amostras para que seja possível realizar uma análise estatística consistente dos resultados obtidos. A Figura 10 representa a geometria dos corpos de prova utilizados no teste de *push-off*.

Figura 10 – Modelo de corpo de prova para ensaio de *push-off*



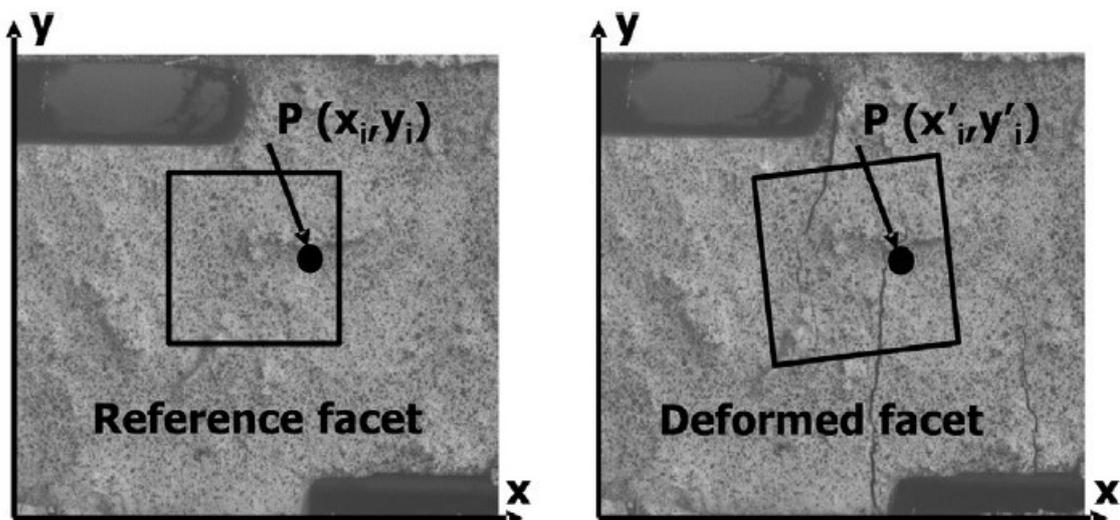
Fonte: Savaris (2016)

As medições de deslocamentos e deformações dos ensaios são realizadas, majoritariamente por extensômetros e transdutores de deslocamento (LVDT). Entretanto, devido a limitação e imprecisão desses equipamentos, o processo de análise de dados torna-se moroso (Dias-Da-Costa *et al.*, 2010).

Como as fissuras são formadas de maneira aleatória, as análises do comportamento pós-fissuração com o auxílio de LVDTs pode ser imprecisa, uma vez que o equipamento precisa ser instalado em um local fixo antes da realização do ensaio, que pode ser ou não estratégico na hora de coletar os dados. Uma forma alternativa de registrar as aberturas de fissuras é a técnica da correlação de imagens digitais (CID). Tal meio possibilita capturar o surgimento e analisar o desenvolvimento das fissuras.

Ademais, as deformações podem ser mensuradas por meio da correlação das imagens com o movimento relativo de cada ponto no tempo inicial e no tempo t , em que se deseja fazer a análise, como apresentado na Figura 11. Para que esta técnica seja possível, é necessário preparar os corpos de prova de forma que formem um fundo monocromático com um padrão aleatório de pontos (Figura 12). A partir de então, é possível realizar o registro e rastreamento de imagens da amostra a uma frequência constante, para posterior análise de resultados (Picazo *et al.*, 2018).

Figura 11 – Padrão de pontos para correlação de imagem digital



Fonte: Picazo *et al.* (2018)

Figura 12 – Preparação das amostras para CID



Fonte: Adaptado de Sousa, Garcia e Pierott (2023)

A CID foi desenvolvida a partir do processo de fotografia de, onde técnicas de processamento digital de imagem são utilizadas. Essas técnicas compreendem o rastreamento e registro de imagens a uma frequência constante do elemento a ser analisado (Resende; Cardoso; Shehata, 2021). *Pixels* são pequenos componentes fotossensíveis que, em conjunto, formam uma imagem. Cada pixel diz respeito a um conjunto de números, que são componentes de cor Y, Cb e Cr, e representam uma proporção da luz incidente sobre o objeto fotografado (Santos et al., 2015). Por meio da CID, a diferença da intensidade da luz, os *pixels* Y, Cb e Cr, além da escala cinza de cada pixel, são interpretados.

O processo de interpretação considera um conjunto de pixels ao redor do ponto. Assim, para assegurar que cada área a ser analisada seja singular, deve-se criar um padrão aleatório sobre a superfície em questão. O padrão aleatório permite uma melhor diferenciação dos pixels pelo *software* de análise de imagens do que um padrão cinza, gerado por um padrão regular de pontos (Bomarito *et al.*, 2017).

Diante do exposto, a correlação de imagens digitais pode ser de grande valia para a compreensão dos mecanismos de transferência de tensões ao longo do processo de fissuração do material analisado. Além de possibilitar o entendimento de tal comportamento, o dimensionamento de estruturas mais seguras passa a ser possível.

2.2.5 Influência das fibras na resistência ao cisalhamento do concreto

Segundo Lantsoght (2019), faz-se necessário pesquisas sobre a influência das fibras nas propriedades mecânicas, como resistência à tração do concreto, resistência a flexão e à fadiga, fissuração, ductilidade, retração e fluência, para que seja possível compreender melhor o comportamento de elementos de concreto reforçado com fibras. Com relação à resistência ao cisalhamento, a resistência à compressão do concreto, a dimensão máxima do agregado e a quantidade de armadura longitudinal são fatores atuantes no comportamento de peças de concreto (Sneed; Ramirez, 2010).

As fibras não influenciam diretamente na resistência da zona de compressão do concreto, entretanto, a adição de fibras altera o equilíbrio de forças no elemento estrutural devido às forças de tração resistidas pelas fibras, o que acarreta um aumento da altura da zona de compressão, quando comparado a um elemento de concreto armado sem fibras. Além disso, as fibras fornecem resistência de cisalhamento de forma que, quando há propagação da fissura crítica de cisalhamento, a ruptura pode ocorrer quando essa fissura se estende até a zona de compressão (Lantsoght, 2019).

De acordo com Slobbe, Hendriks e Rots (2012), imediatamente antes da resistência à tração ser alcançada, as microfissuras pré-existentes do concreto começam a aumentar e/ou novas microfissuras surgem graças à separação entre os agregados graúdos e à matriz. Com o aumento da tensão, as microfissuras tendem a se aglutinar, contudo as tensões de tração continuam atuando. Ao passo que a aglutinação é concretizada, forma-se uma macro fissura que elimina a tensão residual.

O mecanismo de transmissão das tensões através da fissura se dá pelas fibras que interligam as fendas, no caso do CRF. Segundo Lantsoght (2019) a dimensão máxima do agregado, a quantidade de fibras e suas propriedades como características de arrancamento e ruptura, geometria e fator de fibra, além da ligação interfacial entre a fibra e a matriz, são parâmetros que influenciam na eficiência desse mecanismo. Ademais, a orientação das fibras na estrutura é importante para a resistência ao cisalhamento, uma vez que as fibras perpendiculares ao plano de fissura são mais eficientes.

Com relação ao efeito de pino, ao comparar concreto reforçado com fibras e concreto armado convencional, pode-se perceber que o primeiro resulta em uma

maior resistência à tração, dessa forma melhora também o mecanismo de efeito de pino. A adição de fibras possibilita uma melhoria nas propriedades de ligação – principalmente contra a falha da ponte – e uma redução da propagação de fissuras, o que leva a uma disseminação mais lenta das fissuras decorrentes do efeito de pino e em uma resistência maior desse mecanismo. Além disso, a contribuição desse efeito compreende 10% a 35% da resistência ao cisalhamento no concreto reforçado com fibras (Lantsoght, 2019).

2.2.6 Estado da arte

Neste item são apresentados alguns estudos recentes sobre o uso de concreto com adição de fibras sintéticas, bem como a utilização de ensaios de cisalhamento direto para avaliar esta propriedade mecânica do concreto reforçado com fibras.

Lanzoni, Nobili e Tarantino (2012) compararam o desempenho de fibra monofilamentada de polipropileno com fibras sintéticas e metálicas comercialmente disponíveis. No trabalho foram analisadas vigas em ensaio de flexão a quatro pontos e lajes para o ensaio de fissuração por retração. Apesar das fibras sintéticas terem afetado negativamente na trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco, estas garantiram valores comparáveis aos fornecidos pela fibra metálica, o que as caracterizaram como favoráveis à resistência e à durabilidade de elementos estruturais de concreto.

Alani e Beckett (2013) verificaram o aumento da resistência à punção em lajes com fibras de polipropileno, quando comparadas com lajes reforçadas com fibras de aço. Nesse caso, a dosagem para desempenho equivalente foi, para fibras sintéticas, de 7 kg/m^3 e, para fibras de aço com ganchos na extremidade, de 40 kg/m^3 .

Liu et al. (2020) fizeram uma comparação entre segmentos de túneis reforçados com fibras de aço e com macro fibras sintéticas. Os autores notaram que, para a mesma dosagem, as fibras sintéticas apresentaram resultados inferiores às fibras de aço, o que reforça a necessidade de se fazer um estudo de dosagem para desempenho equivalente. Entretanto, ao considerar seu baixo peso e boa resistência à corrosão, os autores enfatizam a possibilidade de utilizar as fibras sintéticas como reforço em concretos.

Algin e Gerginci (2020) avaliaram a resistência ao congelamento e descongelamento de concreto reforçado com macro fibras sintéticas. Os autores

consideraram os resultados satisfatórios, onde os fatores de durabilidade para as amostras foram superiores a 60%. Já Camille et al. (2021) estudaram concreto reforçado com macro fibras sintéticas sujeito a carregamentos estáticos e dinâmicos para aplicação em dormentes. Nesse estudo, as fibras minimizaram os modos de ruína estáticos e dinâmicos ao melhorarem o comportamento pós-fissuração do concreto.

Conforti et al. (2017) investigaram a possibilidade de utilizar fibras de polipropileno como reforço em segmentos de túneis hidráulicos pré-moldados. Os autores analisaram, por meio de ensaios de flexão e de carregamento pontual, três modelos de reforços: armadura convencional, apenas fibras e combinação das fibras com barra de aço. Os autores concluíram que as fibras podem ser utilizadas como reforço mínimo de cisalhamento, além de auxiliar na flexão e no fendilhamento. Já para controle do lascamento das estruturas, a opção mista (fibra mais armadura convencional) é mais adequada.

Picazo et al. (2018) fizeram ensaios de *push-off* a partir do reaproveitamento de corpos de prova usados em ensaios de flexão à três pontos, em concretos reforçados com fibras de poliolefinas. Após o ensaio de flexão, os autores utilizaram as metades dos corpos de prova prismáticos, após retirar uma fatia para descartar a superfície de ruptura, para montar os corpos de prova destinados ao ensaio de cisalhamento direto. Por meio da correlação de imagem digital, os autores identificaram os processos de fissuração das amostras.

A partir dos ensaios de cisalhamento direto, a intenção dos pesquisadores foi comparar com os códigos de dimensionamento existentes. Os autores notaram que, se a resistência ao cisalhamento desejada no dimensionamento for referente ao início da fissuração, as normativas apresentam resultados conservadores, porém para deslocamentos de cisalhamento próximos a 2,5 mm, os resultados excedem os obtidos experimentalmente.

Com relação à correlação de imagem digital, os autores afirmam que esta técnica permitiu correlacionar o processo de formação e desenvolvimento da fissura com a tensão de cisalhamento. Além disso, foi possível observar os mecanismos de ruptura dos corpos de prova, devido a possibilidade de gerar vários mapas de deformação ao longo do tempo. Por fim, os autores notaram que as fibras garantiram um aumento de ductilidade do concreto e que os corpos de prova suportaram elevadas tensões de cisalhamento para deslocamentos de até 6 mm.

Picazo et al. (2021) aprofundou sua pesquisa buscando avaliar a acurácia da abordagem – adotada pelas normativas – de avaliar a resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras por meio de ensaios de flexão ao invés da análise por cisalhamento direto. Os pesquisadores estudaram fibras de poliolefinas e de aço, por meio de ensaios de *push-off* e utilizaram correlação de imagem digital para analisar os padrões das fissuras.

Para as fibras de aço, os autores notaram que o aumento do teor de fibras acarretou um aumento de 42% na resistência média ao cisalhamento. Os valores de resistência residual tiveram relação com a dosagem de fibras, pois a uma mesma deformação de cisalhamento, quando comparados os valores de resistência, a mistura com maior teor de fibra obteve um aumento de 61% com relação a mistura com menor teor. Os autores notaram que, para os valores reduzidos de deslocamento das fissuras (0,5 mm) o uso da resistência residual à flexão no dimensionamento subestima a capacidade de carga da estrutura.

Em contrapartida, para deslocamentos de 2,5 mm, a mesma abordagem corrobora com os resultados experimentais. A partir dos dados gerados pela correlação de imagens digitais, os autores concluíram que a relação entre cisalhamento e abertura de fissuras depende da matriz do concreto e do teor de fibras utilizado. Quanto maior a resistência a compressão da matriz e/ou volume de fibras na mistura, menor foi a abertura da fissura para um dado deslocamento.

Araújo, Lobo e Martins (2021) avaliaram a resistência ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras de aço. Os autores realizaram dois ensaios de cisalhamento direto com armadura atravessando o plano de cisalhamento pré-fissurado, para determinar a propagação de fissura de cisalhamento. Observou-se que as fibras contribuem para reduzir a largura da fissura e após atingir a capacidade de carga, as fibras não fornecem auxílio relevante à estrutura. Os autores notaram duas etapas de comportamento ao longo dos ensaios. Para deslizamentos próximos a 0,1 mm, a contribuição das fibras é significativa e as tensões são transferidas em toda a fissura. Uma vez atingida a resistência das fibras, os mecanismos responsáveis pela segunda etapa são o atrito e o engrenamento de agregados. Os autores ainda propuseram um modelo de predição para o deslizamento de cisalhamento baseado na resistência ao cisalhamento do concreto fissurado, no atrito e na contribuição das fibras.

Karim e Shafei (2024) avaliaram a hibridização entre fibras sintéticas e de aço em concreto de ultra alto desempenho sob esforços de tração direta. As fibras sintéticas estudadas foram de nylon, polipropileno, polivinil álcool, vidro resistente a álcalis e fibras de carbono. Para avaliar os padrões de fissuração e modos de ruptura dos corpos de prova, os autores utilizarão correlação digital de imagens. Os autores notaram que as misturas com fibras de carbono (5,28 – 6,93 MPa) resultaram nas maiores resistências a tração direta, quando comparadas com fibras de PVA (4,88 – 6,90 MPa), vidro (4,18 – 6,49 MPa), polipropileno (3,61 – 4,53 MPa) e nylon (2,37 – 3,67 MPa).

Alimrani e Balazs (2023), realizaram ensaios de push-off em 75 corpos de prova para avaliar a resistência ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras, após exposição ao calor. Os autores avaliaram a adição de fibras de aço, apenas, e misturadas com fibras de polipropileno submetidas a temperaturas que variavam de 20° C a 700° C. Em temperatura ambiente, a mistura das fibras resultou em um aumento de 58,9% na resistência ao cisalhamento, quando comparada ao concreto sem adição de fibras. Porém, para temperaturas próximas a 700° C, o aumento foi de apenas 27,3%.

Diante do exposto, a complexidade acerca dos mecanismos de resistência ao cisalhamento do concreto, especialmente quando este é reforçado com fibras, acarreta a necessidade de estudos sobre o tema. Além disso, poucos são os estudos que visam analisar tal situação com o reforço de fibras sintéticas, apenas. Portanto, o presente trabalho procura auxiliar a preencher essa lacuna, fornecendo dados que possam auxiliar em estudos futuros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Classificação e posicionamento da pesquisa

A presente pesquisa teve como finalidade a adição de macro fibras sintéticas ao concreto, com o objetivo de se ter uma maior familiaridade com o compósito a partir do estabelecimento de relação entre possíveis variáveis, ou seja, tem caráter descritivo. Desse modo, a abordagem da pesquisa é tanto qualitativa, como quantitativa e seus dados foram obtidos experimentalmente, por meio de ensaios de laboratório (Gil, 2002).

3.2 Principais etapas da pesquisa

Como o objetivo principal da pesquisa foi analisar a influência da adição de fibras sintéticas na resistência ao cisalhamento de estruturas de concreto, foram avaliados diferentes teores de fibra nas misturas: 0 kg/m³, 4,85 kg/m³ e 14,55 kg/m³, correspondentes a 0, 0,5% e 1,5% do volume de concreto, respectivamente.

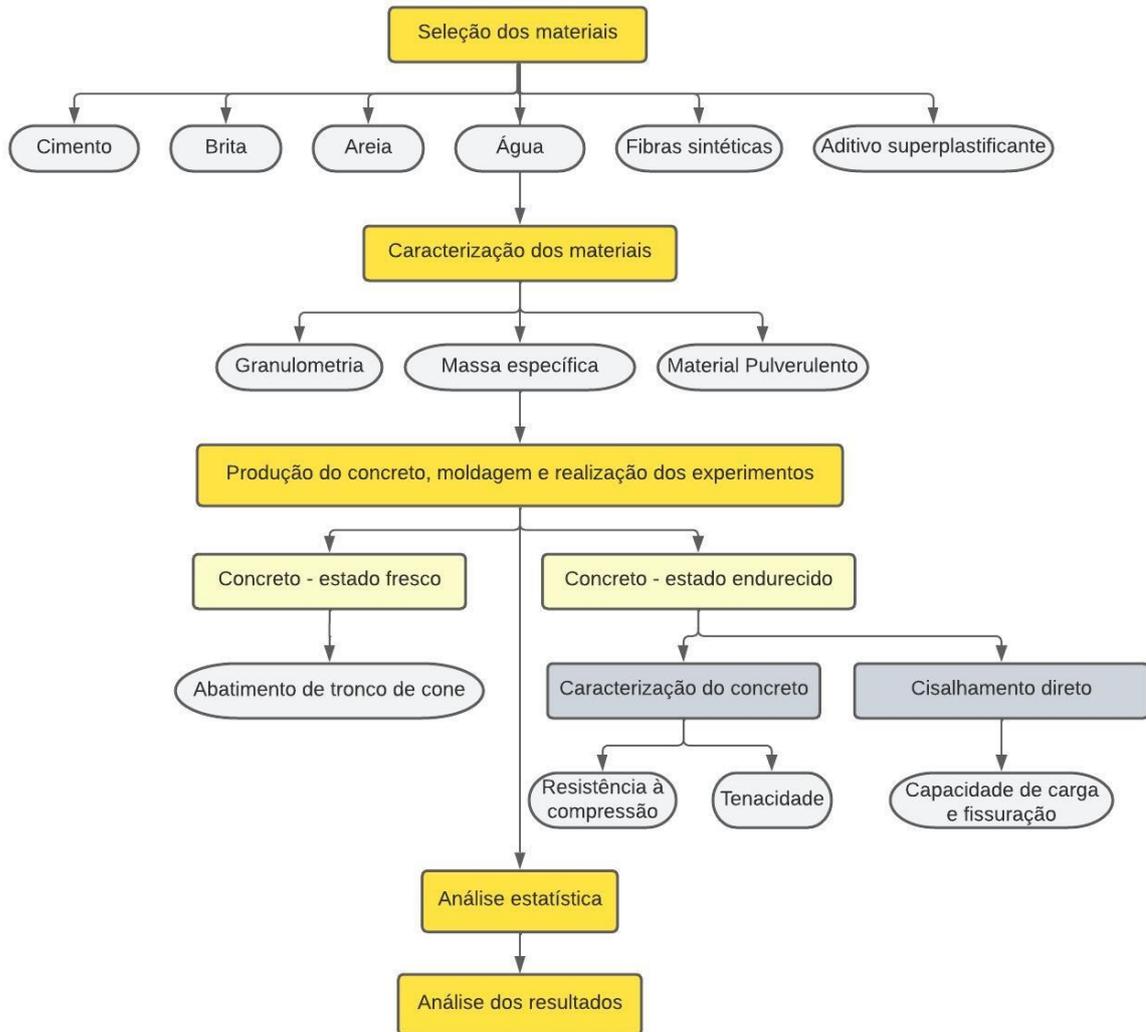
Foram moldados, para cada mistura, 6 corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) e 4 corpos de prova prismáticos de dimensões 100 mm (base e altura) por 400 mm de comprimento para a caracterização do concreto, com relação à resistência à compressão e tenacidade, respectivamente. O adensamento do concreto foi realizado com o auxílio de uma mesa vibratória. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água para cura úmida por 28 dias, até a data de realização dos ensaios. Para o ensaio de cisalhamento direto (*push-off*) foram moldados 4 corpos de prova de cada mistura. As dimensões e especificações dos corpos de prova utilizados no ensaio de *push-off* serão descritas posteriormente.

O trabalho foi desenvolvido em três etapas de estudos experimentais, de acordo com a Figura 13 e Tabela 3: seleção dos materiais empregados, produção das misturas e moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios. Na primeira etapa, além da seleção dos materiais, realizou-se a caracterização física dos agregados, de acordo com as prescrições normativas apresentadas na Tabela 3.

As misturas do concreto foram produzidas e moldadas com a adição dos teores de fibras estipulados. A trabalhabilidade foi ajustada com a utilização de aditivo superplastificante. A quarta etapa, por sua vez, diz respeito à caracterização do concreto reforçado com fibras sintéticas quanto ao seu comportamento mecânico.

Para isso, foram realizados, de acordo com as recomendações normativas, os testes de resistência à compressão e de tenacidade, além do teste de cisalhamento direto, do tipo *push-off*.

Figura 13 – Fluxograma das atividades



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4 – Ensaio necessários ao desenvolvimento da pesquisa

Tipo do ensaio	Ensaio	Normativa
Materiais	Composição granulométrica	ABNT NBR NM 17054 (2022)
	Massa específica	ABNT NBR NM 52 (2009)
		ABNT NBR NM 53 (2009)
	Material Pulverulento	ABNT NBR NM 46 (2003)
Concreto no estado fresco	Espalhamento	ABNT NBR NM 67(1998)
Concreto no estado endurecido	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (2018)
	Tenacidade	ABNT NBR 16940 (2021)
Cisalhamento direto	<i>Push-off</i>	Não normatizado

Fonte: Autoria própria (2024)

3.3 Descrição das etapas

3.3.1 Materiais

O cimento CP-II-Z, com 6% a 14% de material pozolânico em sua composição, foi utilizado como material aglomerante. Como agregado miúdo, foi utilizada areia quartzosa de rio e o agregado graúdo utilizado tem origem basáltica de dimensão máxima característica (DMC) igual a 12,5 mm. Os resultados da caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 4. As porcentagens de material retido acumulado sobre as peneiras e a curva de distribuição granulométrica estão disponibilizados no Apêndice A.

Tabela 5 – Caracterização dos agregados

Propriedade	Areia	Brita 1
Dimensão máxima característica (mm)	-	12,50
Módulo de finura	1,67	-
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,51	2,86
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,52	2,92
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,55	2,86
Absorção de água (%)	-	2,27
Teor de material pulverulento (%)	-	0,80

Fonte: Autoria própria (2024)

O aditivo superplastificante foi utilizado de forma a garantir a trabalhabilidade desejada nos traços com adição de fibras. Para esta pesquisa, adotou-se o ADVA 800 da marca GCP. Para a mistura de referência, adicionou-se 20 gramas de aditivo, quantidade equivalente à 0,07% da massa de cimento. O abatimento de tronco de cone foi de 15 cm. No caso das misturas com adição de fibras, foi necessário adotar a quantidade equivalente à 0,1% da massa de cimento, ou seja, 30 gramas de aditivo, obtendo-se abatimento igual a 17 cm e 15 cm para as misturas com adição de 0,5% e 1,5% de fibras, respectivamente.

3.3.1.1 Fibra sintética

No presente trabalho, optou-se por utilizar macro fibra estrutural sintética Robustech 43, de polietileno aditivado (Figura 14), com propriedades fornecidas pelo fabricante apresentadas na Tabela 5.

Figura 14 – Macro fibra sintética



Fonte: TEC Machine ® (2023)

Tabela 6 – Propriedades das macro fibras sintéticas

Comprimento (mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)	Fator de forma
40-45	590-650	5,2	0,97	43

Fonte: TEC Machine® (2023)

3.3.2 Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova

O traço utilizado para o concreto de referência foi de 1:2,49:2,79 (cimento, areia, brita), empregado por Turetta et al. (2021), para o qual estimou-se resistência à compressão próxima a 30 MPa e abatimento superior a 12 cm.

Com o intuito de verificar a influência das fibras na resistência ao cisalhamento e no comportamento pós-fissuração do concreto, foram avaliadas três misturas. Em que CR representa o concreto de referência, CF refere-se ao concreto reforçado com fibras. Os números que acompanham a letra F, indicam a proporção de material na mistura (por exemplo, CF0,5 corresponde a uma adição de 0,5% de macro fibras sintéticas). A quantidade de material a ser utilizado em 1 m³ de concreto é apresentada na Tabela 6.

Tabela 7 – Traço para produção de 1m³ de concreto

Mistura	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Fibras (kg/m ³)	Aditivo (g/m ³)
CR	391,03	877,88	1037,31	194,87	-	273,72
CF0,5	391,03	877,88	1037,31	194,87	4,85	391,03
CF1,5	391,03	877,88	1037,31	194,87	14,55	391,03

Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.2.1 Resistência à tração na flexão

A análise do comportamento do concreto submetido à ensaios de tração na flexão, compreende, além da resistência à tração em si, o limite de proporcionalidade e as resistências residuais com base no carregamento e na abertura do entalhe (CMOD), conforme definido na norma NBR 16940 (ABNT, 2021).

A medição da abertura do entalhe ao longo do ensaio, foi feita de duas formas: por meio de dois transdutores lineares de deslocamento (LVDT), posicionados um de cada lado do entalhe, na base do corpo de prova, conforme Figura 15, e por meio de correlação de imagem digital (CID). Os gráficos de força x CMOD (abertura do entalhe) foram comparados, considerando o uso de LVDT e de CID e, a partir de então avaliou-se a correlação entre as técnicas de medição.

Figura 15 – Ensaio de tenacidade: disposição dos LVDTs



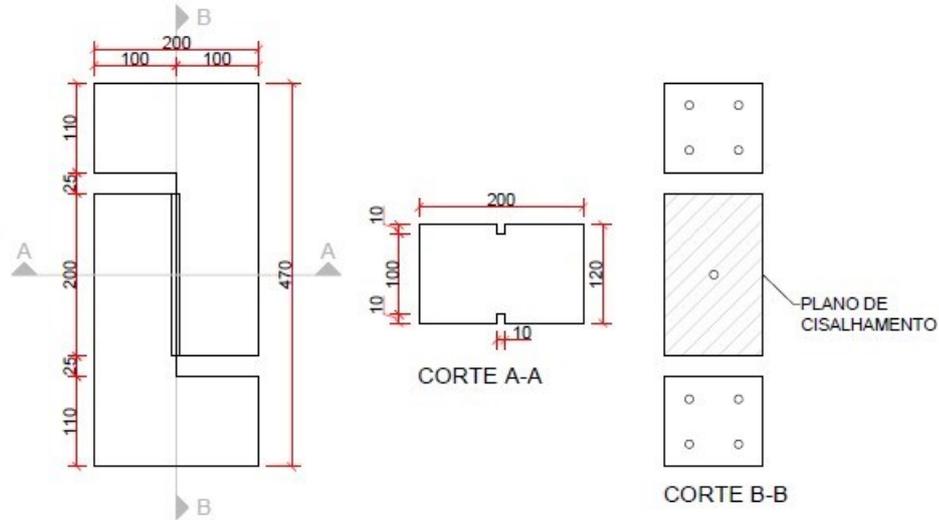
Fonte: A autoria própria (2024)

3.3.2.2 Ensaio de *push-off*: corpos de prova e instrumentação

Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto do tipo *push-off*, foram produzidos com dimensões similares às utilizadas por Savaris (2016).

As fôrmas foram montadas em MDF com dimensões dispostas na Figura 16, assim, cada corpo de prova consumiu, aproximadamente, 11 litros de concreto. Para assegurar a redução da seção, de forma que o rompimento do plano indicado seja garantido, foram inseridos dois filetes de madeira nas paredes do molde, de maneira que a área de cisalhamento seja de, aproximadamente, 20.000 mm².

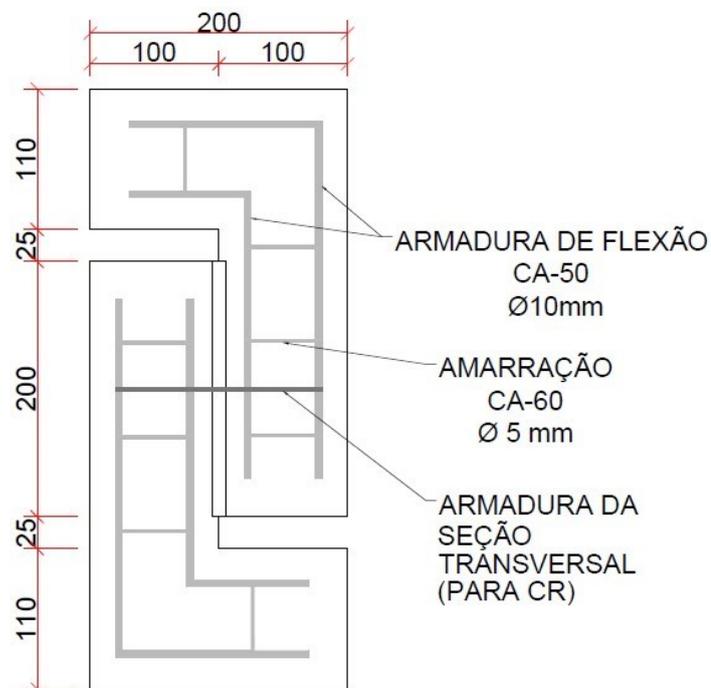
Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de *push-off*, em mm



Fonte: Adaptado de Savaris (2016)

A armadura de montagem dos corpos de prova foi composta por barras de aço CA-50 com 10,0 mm de diâmetro, de acordo com as Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Representação da armadura utilizada nos corpos de prova para ensaio de *push-off*, com dimensões em mm



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 18 – Forma e armadura dos corpos de prova com armadura da seção transversal



Fonte: Autoria própria (2024)

Com a finalidade de se avaliar a possibilidade de substituir a armadura transversal mínima de vigas proposta na norma NBR 6118 (ABNT, 2023) por macro fibras sintéticas, apenas na amostra com o concreto de referência foi inserida a armadura que atravessa a interface de cisalhamento. A taxa de armadura adotada foi calculada a partir da Equação 9.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \operatorname{sen} \alpha} \quad (9)$$

Em que: A_{sw} é a área da seção transversal dos estribos, s é o espaçamento dos estribos, segundo o eixo longitudinal do elemento, b_w é a largura média da alma, ao longo da altura útil da seção, α refere-se à inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal e ρ_{sw} à taxa de armadura.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023) a taxa de armadura deve ser igual ou superior à 20% da razão entre a resistência média à tração do concreto e a resistência característica ao escoamento do aço da armadura transversal. Assim, a área mínima de reforço necessária para esse caso foi de 0,26 cm². Adotou-se então, uma barra de aço CA-50 de diâmetro nominal igual a 6,3 mm, com dobras nas extremidades para possibilitar a amarração na armadura de montagem (Figura 16).

Para a avaliação do comportamento pós-fissuração e monitoramento dos ensaios de cisalhamento direto, foi adotado o método de correlação de imagens digitais (CID). Este método consiste em criar um plano de fundo, por meio de pintura com tinta branca, para receber um padrão aleatório de pontos pretos – a partir da pulverização de tinta preta em spray – de modo que seja possível fazer um rastreamento dos pontos e possibilitar uma leitura adequada dos dados por um *software* de análise de imagens.

A captura de imagens se deu por meio de uma câmera digital modelo Coolpix P100, da marca Nikon e um tripé, de forma que a estabilidade e o posicionamento ideal da câmera sejam garantidos. A instrumentação está apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Instrumentação do ensaio de *push-off*



Fonte: Autoria própria (2024)

A frequência das fotografias foi limitada a uma imagem a cada cinco segundos e então, as análises foram realizadas por meio do *software* GOM Correlate. Inicialmente, coletou-se imagens teste para garantir que o padrão aleatório gerado possibilitasse a leitura dos dados e posterior análise, esse processo de verificação é representado pela Figura 20, no qual a qualidade da imagem é indicada pela cor verde.

Figura 20 – Verificação da qualidade da imagem



Fonte: Autoria própria (2024)

Na etapa de análise das imagens foram dispostos pontos sobre a superfície estudada próximos à fissura, para determinar a abertura desta ao longo do carregamento, conforme mostra a Figura 21. Foram medidos os deslocamentos horizontais e verticais de cada ponto, em que o primeiro se refere à abertura de fissuras e o segundo, ao deslocamento vertical da fissura. Para a comparação de resultados, foram gerados gráficos de tensão (MPa) por abertura de fissura (w , em milímetros).

Figura 21 – Pontos para análise da abertura de fissuras



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.3 Análise dos resultados

Para o ensaio de resistência à compressão, a avaliação do efeito da adição de macro fibras sintéticas na mistura do concreto foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA) e teste estatístico de comparação de médias (Tukey Kramer). Já para os ensaios de tenacidade e de cisalhamento direto, realizou-se o teste T de Student para amostras independentes para avaliar o efeito da adição de fibras, devido ao menor número de amostras. Em ambos os testes de comparação de médias, comparou-se as dosagens duas a duas, conforme apresentado por Navidi (2012).

A análise estatística se inicia por meio da correlação do grau de liberdade com uma função densidade de probabilidade e, a partir disso, são definidos níveis de confiança para a comparação de médias. Os resultados são considerados relevantes estatisticamente quando os níveis de confiança encontrados estão na faixa de 95% a 99,9% (Navidi, 2012). Para a avaliação dos resultados, também foram usadas medidas estatísticas descritivas como média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Além do exposto, os resultados de cisalhamento direto obtidos experimentalmente foram comparados com as equações preditivas descritas na Tabela 1 e na seção 2.2.3. A aplicabilidade das equações foi avaliada com base no método estatístico Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e na Classificação por Pontos de Demérito de Collins (DPC). A RMSE avalia a diferença entre a amostra estimada e a obtida experimentalmente e, por ser expresso nas mesmas unidades dos dados analisados, possibilita comparações mais objetivas (Evans, 2013). Seu cálculo é feito por meio da Equação 10.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n_o} (A_t - F_t)^2}{n_o}} \quad (10)$$

Na qual: A_t representa o valor observado, F_t refere-se o valor calculado e n_o indica o número de observações.

Como as diferenças são elevadas ao quadrado, o RMSE confere um peso maior a maiores erros. Dessa forma, tal metodologia é indicada para avaliar a precisão dos valores estimados, uma vez que erros elevados podem indicar superdimensionamento ou subdimensionamento dos elementos estruturais, ou seja, são indesejáveis.

Já o método DPC leva em consideração a segurança e viabilidade econômica das equações ao estabelecer penalidades para cada situação avaliada, a partir da relação entre a força de cisalhamento experimental e a estimada. Conforme tal razão aumenta, a equação é considerada mais segura e a penalidade é reduzida. Todavia, elementos denominados conservadores recebem penalidade por não serem considerados econômicos devido ao seu superdimensionamento. O resultado da penalidade é obtido por meio da soma de situações observadas em cada intervalo multiplicado pelo respectivo valor de penalidade. Dessa forma, quanto maior a penalidade, pior é o uso da equação para o dimensionamento da estrutura (Collins, 2001). A Tabela 7 apresenta os intervalos de classificação DPC.

Tabela 8 – Classificação DPC

$\tau_{experimental} / \tau_{estimada}$	Classificação	Penalidade
$\tau_{experimental} / \tau_{estimada} \leq 0,5$	Extremamente perigosa	10
$0,5 < \tau_{experimental} / \tau_{estimada} \leq 0,65$	Perigosa	5
$0,65 < \tau_{experimental} / \tau_{estimada} \leq 0,85$	Pouco segura	2
$0,85 < \tau_{experimental} / \tau_{estimada} \leq 1,3$	Segurança apropriada	0
$1,3 < \tau_{experimental} / \tau_{estimada} \leq 2$	Conservadora	1
$\tau_{experimental} / \tau_{estimada} > 2$	Muito conservadora	2

Fonte: Adaptado de Collins (2001)

Por fim, para a comparação entre os métodos de obtenção da abertura do entalhe (LVDT e CID), avaliou-se a correlação de Pearson entre os conjuntos de dados gerado. O coeficiente de correlação de Pearson varia de -1 a 1 e valores próximos a 1 indicam correlação positiva forte, enquanto valores próximos a -1, indicam correlação negativa forte. Caso o coeficiente seja 0, indica ausência de correlação linear entre o conjunto de dados (Stanton, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção é destinada à apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Tais resultados dividem-se em três partes principais: resistência à compressão do concreto, resistência à tração na flexão e resistência ao cisalhamento direto.

4.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão aos 28 dias, bem como os valores médios de resistência à compressão, o desvio padrão e os coeficientes de variação, estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 9 – Resistência à compressão

CP	CR	CF0,5	CF1,5
1	23,44	20,91	19,12
2	27,47	22,04	18,16
3	26,87	21,99	18,55
4	26,67	20,08	18,7
5	26,99	20,54	17,84
6	25,05	20,23	17,83
Média	26,08 ^a	20,97 ^b	18,37 ^c
Desvio padrão	1,5338	0,8618	0,5139
CV	5,88%	4,11%	2,80%
p-valor	8,014e ⁻⁹		

Fonte: Autoria própria (2024)

A partir dos resultados expostos, nota-se que, em ambos os casos, a adição de fibras resultou em uma redução da resistência à compressão, quando comparados à mistura de referência, da mesma forma que o observado por Ozturk, Atahan e Ozyurt (2022) e por Yan et al. (2023). A mistura com adição de 0,5% apresentou uma redução de 19,62% e a mistura com adição de 1,5%, 29,58%. Além disso, observa-se uma menor dispersão de resultados com o aumento do percentual de fibras na mistura.

Para avaliar se houve diferença significativa entre os resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para nível de significância de 0,05. A partir do p-valor percebe-se que a diferença entre os resultados é significativa, o que difere do obtido por outras pesquisas (Bošnjak; Sharma; Grauf, 2019; Camille et al., 2021). Ao realizar

o teste de Tukey-Kramer para comparação de médias, constata-se que há diferença significativa entre os três tratamentos, desta forma indica-se com letras diferentes as médias na Tabela 8. Esta situação pode ser explicada pela quantidade de aditivo utilizada, que foi superior nas misturas com fibras, ou pela distribuição não padronizada das fibras na mistura, o que pode afetar no valor de resistência à compressão.

De acordo com Camille *et al.* (2021), a medida em que o teor de fibras é aumentado, a resistência à compressão do concreto pode apresentar redução significativa devido a aglomeração das fibras, com a presença de vazios indesejados e redução considerável na trabalhabilidade. Para essa situação, recomenda-se revisar o traço escolhido para o concreto, optando-se por concretos mais fluidos.

Além disso, as fibras de polietileno podem acarretar a redução da resistência do concreto devido ao aumento da porosidade e dos vazios presentes no compósito, o que leva a uma perda da resistência de ligação interfacial entre a matriz cimentícia e os agregados (Yan *et al.*, 2023).

4.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão das misturas avaliadas estão dispostos na Tabela 9. Apesar dos valores de resistência das misturas de concreto com adição de fibras terem sido inferiores ao concreto de referência, com uma redução de 11,99% para utilização de 0,5% de fibras e 12,84% para 1,5% de fibras, os resultados não apresentaram diferença estatística entre si, o que corrobora com o obtido por Ozturk, Atahan e Ozyurt (2022). O teste T de Student foi realizada para um nível de significância de 0,05.

Tabela 10 – Resistência à tração na flexão (MPa)

CP	CR	CF0,5	CF1,5
1	3,77	2,87	2,84
2	4,05	3,47	3,20
3	4,11	3,69	3,15
4	3,10	3,19	3,90
Média	3,76	3,31	3,27
Desvio padrão	0,4646	0,3569	0,4478
CV	12,37%	10,80%	13,68%

Fonte: Autoria própria (2024)

Os principais parâmetros a serem avaliados no ensaio de resistência à tração na flexão de concretos reforçados com fibras é o limite de proporcionalidade (LOP) e as resistências residuais. O LOP é o valor que representa a maior tensão obtida no intervalo de abertura do entalhe (CMOD) de 0 a 0,05 mm, enquanto as resistências residuais referem-se às tensões equivalentes às aberturas de CMOD contidas no intervalo de 0,05 a 4 mm. Os valores de limite de proporcionalidade (LOP), bem como de resistências residuais, em N/mm², de cada mistura são apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 11 – LOP, em N/mm²

CP	CR	CF0,5	CF1,5
1	3,8	2,9	2,8
2	4,0	3,5	3,2
3	4,1	3,7	3,2
4	2,3	3,2	2,9
Média	3,5	3,3	3,0

Fonte: A autoria própria (2024)

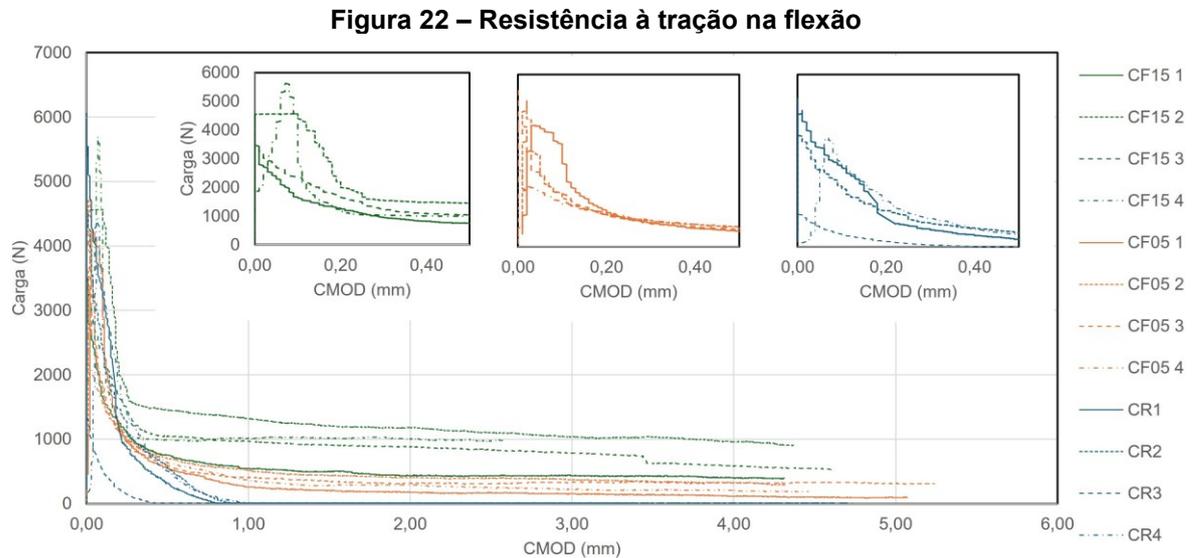
Tabela 12 – Resistências residuais, em N/mm²

Mistura	CP	CMOD ₁ =0,5	CMOD ₂ =1,5	CMOD ₃ =2,5	CMOD ₄ =3,5
CR	1	0,2	0,0	0,0	0,0
	2	0,4	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0
	4	0,4	0,0	0,0	0,0
CF0,5	1	0,4	0,1	0,1	0,1
	2	0,5	0,3	0,3	0,2
	3	0,4	0,2	0,2	0,2
	4	0,4	0,2	0,2	0,1
CF1,5	1	0,5	0,3	0,3	0,3
	2	1,0	0,9	0,8	0,7
	3	0,7	0,6	0,6	0,4
	4	0,7	0,7	0,7	0,7

Fonte: A autoria própria (2024)

Apesar do valor médio de limite de proporcionalidade ser maior para o concreto de referência, percebe-se que, ao avaliar as resistências residuais, conforme a abertura do entalhe aumenta, apenas as misturas com adição de fibra apresentam resistência residual ao longo de todo o ensaio. Isso se dá devido à ancoragem das fibras na matriz, que por transferência de tensões via efeito de ponte, resultam em melhores valores de resistências residuais (Alhassan et al., 2022; Badogiannis;

Christidis; Tzanetatos, 2019; Kobayashi; Cho, 1982). Tal comportamento tem relação com o volume de fibras utilizado e pode ser mais bem observado a partir dos gráficos de carga x CMOD, na Figura 22.

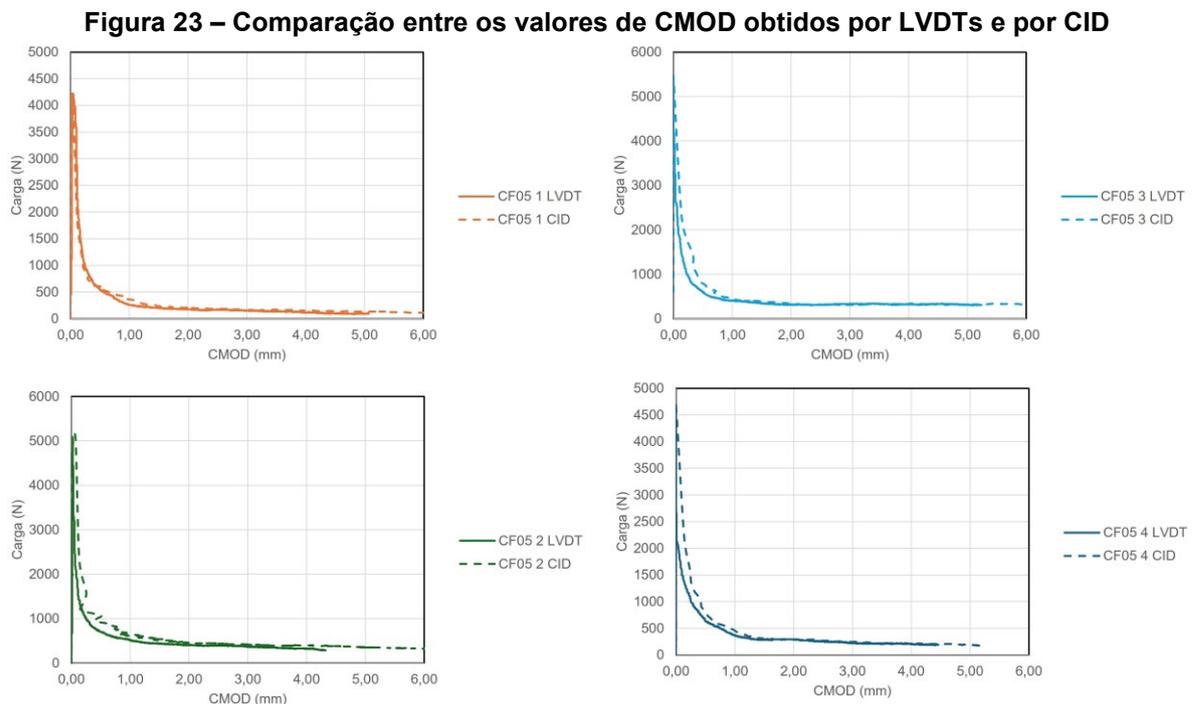


Fonte: Autoria própria (2024)

A partir da Figura 22, percebe-se que, uma vez atingida a carga última, os corpos de prova de referência colapsam, ao passo que os com adição de fibra ainda resistem a pequenos esforços antes da falha. A mistura CF1,5 obteve, em média, ao longo das aberturas do entalhe referentes a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm, valores de resistência residual iguais a 0,7 N/mm², 0,6 N/mm², 0,6 N/mm² e 0,5 N/mm², respectivamente. Para a mistura CF0,5 os valores médios de resistência residual foram de 0,4 N/mm² no CMOD de 0,5 mm e, para as demais aberturas de entalhe, 0,2 N/mm². Já para o CR, houve resistência residual apenas para o menor CMOD (0,5 mm), com média igual a 0,2 N/mm².

De acordo com a literatura, o aumento da resistência residual ocorre devido ao fato de as fibras aumentarem a ductilidade do concreto, tornando-o menos frágil, ou seja, permite que o material aceite uma maior deformação antes de ruir (Lantsoght, 2019; Rauecker et al., 2019; Zhang; Han; Hua, 2018). Além disso, a adição de macro fibras sintéticas não altera o carregamento correspondente ao início da fissuração. Sua influência se dá na melhoria da ductilidade do material a partir do aprimoramento do comportamento pós-fissuração, representado pelas resistências residuais (Lakavath, Suriya Prakash e Dirar, 2021).

Além do exposto, foi feita uma avaliação quanto à aplicabilidade de correlação digital de imagens para obter os valores de CMOD. Para isso, optou-se por avaliar os resultados referentes à mistura CF0,5. Os gráficos comparativos de carga por CMOD dispõem-se na Figura 23. Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos entre os dados de CMOD medidos pelos transdutores lineares de deslocamento (LVDTs) e pela correlação de imagens digitais (CID) foi de 0,9975 para o CP1, 0,9977 para o CP2, 0,9939 para o CP3 e 0,9952 para o CP4.



Fonte: Autoria própria (2024)

A partir dos gráficos dispostos na Figura 23 e valores de correlação, pode-se concluir que os resultados obtidos via CID apresentaram boa aproximação dos resultados via LVDT, conforme a recomendação normativa. Dessa forma, é válido utilizar a correlação de imagem digital como um meio alternativo de se obter o CMOD.

4.3 Resistência ao cisalhamento direto

Os valores de resistência ao cisalhamento direto, bem como a média, desvio padrão e coeficiente de variação das misturas, estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 13 – Resistência ao cisalhamento direto (MPa)

CP	CR	CF0,5	CF1,5
1	4,04	2,80	3,05
2	3,43	3,44	2,75
3	3,47	3,10	3,14
4	3,94	2,64	2,45
Média	3,72	2,99	2,85
Desvio padrão	0,3137	0,3512	0,3117
CV	8,44%	11,73%	10,94%

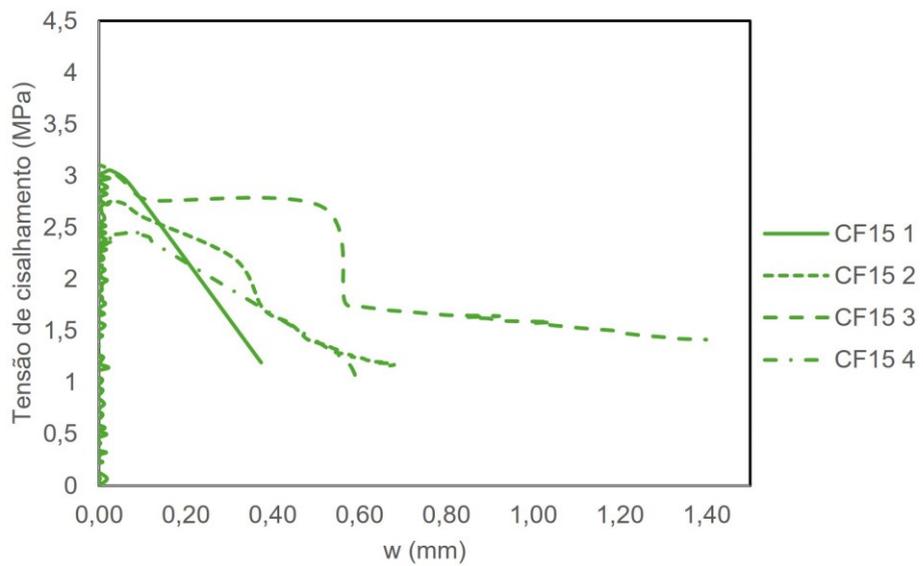
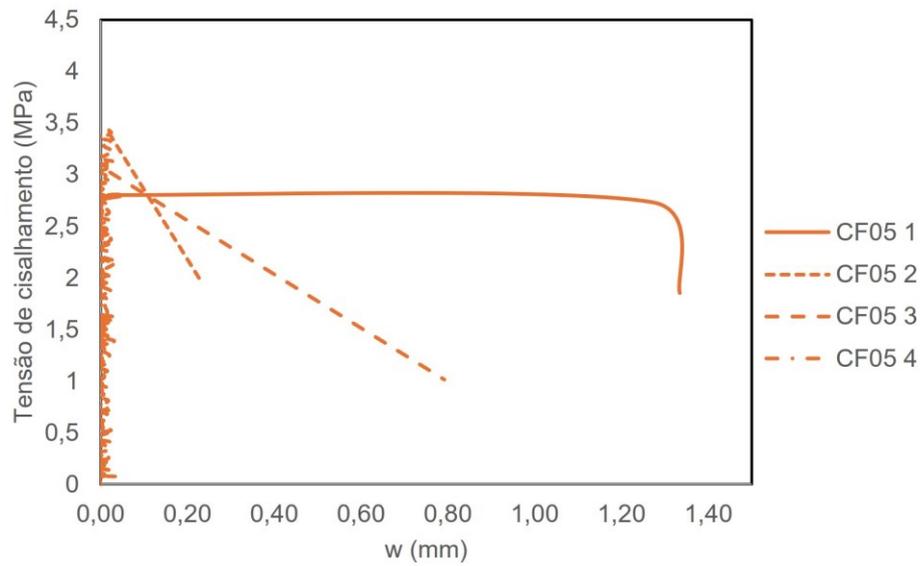
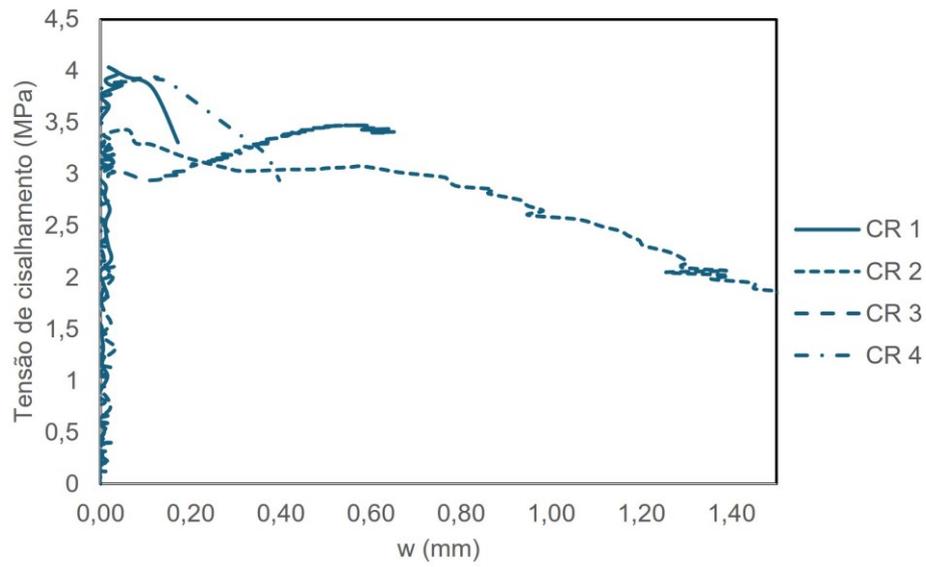
Fonte: Autoria própria (2024)

Diferente do observado por Picazo et al. (2018), que observou aumento da resistência ao cisalhamento relacionado com o aumento do volume de fibras utilizado, observou-se, nesse programa experimental, uma redução da resistência com o aumento do teor de fibras. O CF0,5 obteve resistência ao cisalhamento direto 19,89% inferior ao CR, enquanto para o CF1,5, notou-se uma redução de 23,41% da resistência quando comparado ao CR. A partir do teste T de Student, verificou-se diferença significativa entre as resistências do CR e do CF. Entre as misturas com fibras, não foi verificada diferença significativa.

4.3.1 Abertura de fissuras

Os gráficos de tensão cisalhante por abertura de fissura (w), são apresentados na Figura 24 e os valores de w máximos e deslizamentos verticais das fissuras máximos ($\delta_{\text{máx}}$), bem como as tensões máximas de cisalhamento, estão dispostos na Tabela 13. Dos gráficos, percebe-se um período inicial bastante similar para todas as misturas, caracterizado pelo comportamento linear-elástico inicial do material, o que corrobora com o observado por Araújo, Lobo e Martins (2021) e Picazo et al. (2021). Tal situação é esperada, uma vez que a fase inicial é associada ao comportamento da matriz cimentícia.

Figura 24 – Tensão cisalhante vs. abertura de fissuras



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 14 – Relação de tensão máxima de cisalhamento, w máximo e δ máximo

CP	CR			CF0,5			CF1,5		
	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)
1	4,03	0,335	0,306	2,80	1,940	0,638	3,05	0,524	0,253
2	3,43	1,741	3,707	3,44	0,386	0,157	2,75	0,986	0,626
3	3,47	1,285	0,819	3,10	1,045	0,301	3,14	2,140	1,651
4	3,94	0,634	0,378	2,64	0,919	0,159	2,45	0,952	0,340
Média	3,72	0,999	1,302	2,99	1,073	0,314	2,85	1,151	0,718

Fonte: Autoria própria (2024)

Uma vez que se inicia o processo de fissuração, em todos os casos, há uma redução brusca da tensão atuante seguida de um período de estabilização. No caso do concreto de referência (CR), assim como o observado por Araújo, Lobo e Martins (2021) a presença da armadura mínima restringiu a abertura da fissura, que ficou limitada entre o período de deformação da barra de aço e seu escoamento.

Já para as misturas com adição de macro fibras sintéticas, houve também uma estabilização da resistência do material após maiores aberturas de fissuras, com comportamento de *strain-softening*, uma vez que houve uma perda da capacidade resistente após a fissuração da matriz. Porém, nos exemplares CF05 2, CF05 3 e CF15 1, essa estabilização não foi observada. Para os exemplares CF05 2 e CF15 1, as aberturas máximas de fissura foram as menores dentro do conjunto de dados e as resistências ao cisalhamento referentes aos $w_{m\acute{a}x}$, não atingiram 40% das resistências máximas, ou seja, logo após o início da fissuração os três exemplares atingiram a ruína. De acordo com Souza (2021), quando as fibras não estão bem dispersas na mistura, os vazios presentes na matriz aumentam, o que acarreta o aumento da porosidade do concreto, o aumento da zona de transição interface e, conseqüentemente, o comportamento frágil do material.

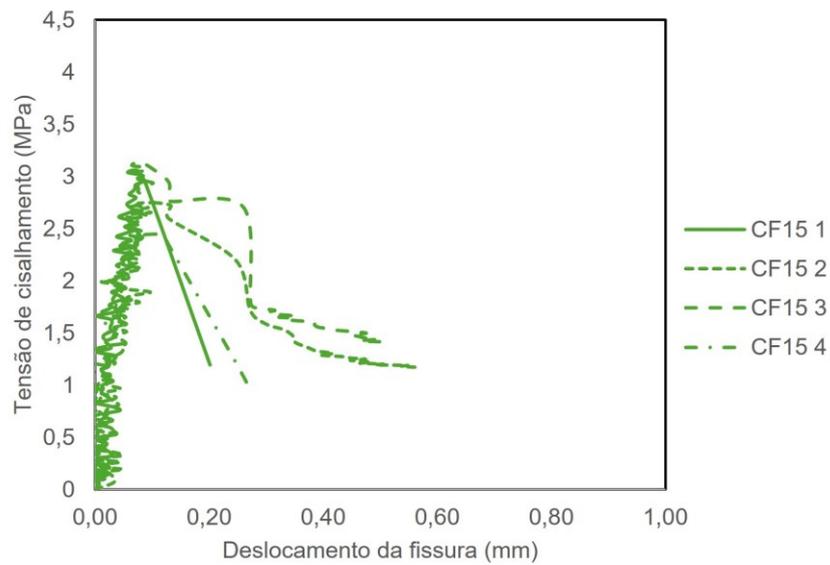
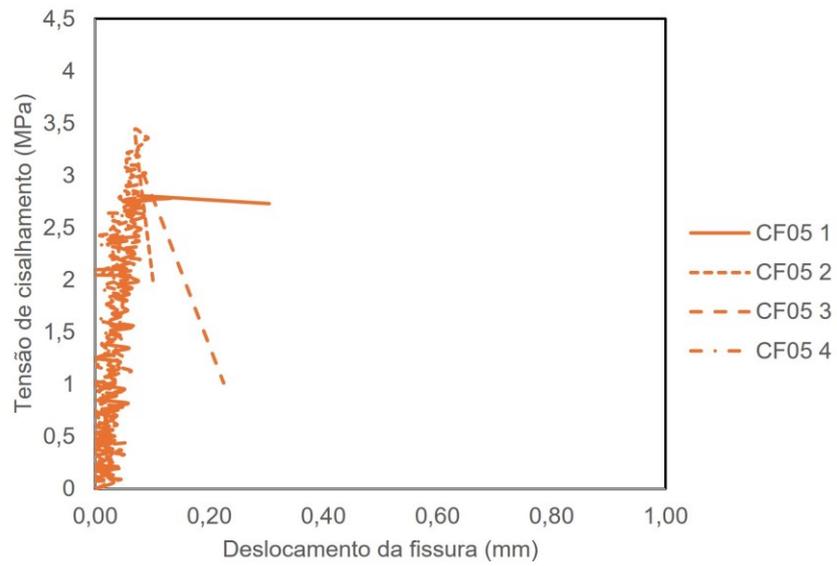
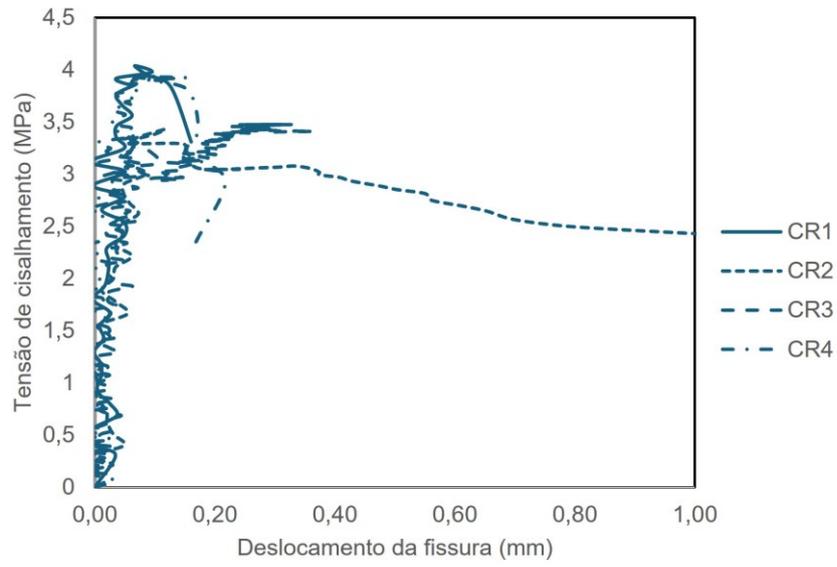
Com respeito à média das aberturas máximas das fissuras, nota-se que o concreto de referência resultou no menor valor. Em contrapartida, a média das aberturas máximas de fissura correspondente ao CF1,5 foi a maior observada, com um aumento de 15,21% quando comparada com o CR e 7,27% quando comparada com o CF 0,5. Este comportamento se deu, provavelmente, devido à presença de uma única barra de aço restringindo a abertura, enquanto nos exemplares com fibras a restrição da abertura da fissura era distribuída ao longo do plano de cisalhamento.

Percebe-se, também, a partir dos gráficos que a tensão máxima no caso das fibras é alcançada em valores menores de w quando comparadas com o CR. Araújo, Lobo e Martins (2021) observaram o mesmo comportamento e concluíram que a presença de fibras contribuiu para a redução da abertura das fissuras do plano de cisalhamento na fase anterior à tensão de pico. Com relação às aberturas máximas de fissura, pode-se dizer que, mesmo à maiores aberturas, as fibras auxiliam na resistência residual do material por conseguir transferir tensões por meio das fissuras.

Após o início da fissuração, para o CF15, é possível dividir o comportamento do material em duas etapas, assim como Picazo *et al.* (2021). Na primeira, há uma diminuição repentina da carga logo após o início da fissuração. Na segunda etapa, há uma tensão residual com diminuição da tensão e abertura da fissura significativa. Os processos de fissuração ocorreram, em geral, de forma mais gradual com inclinação moderada, o que é vantajoso quando se quer evitar a fragilidade do material.

Os deslocamentos verticais no plano de cisalhamento estão apresentados na Figura 25. A fase inicial apresentou um comportamento linear até deslocamentos de, aproximadamente 0,2 mm, caracterizada pela deformação do concreto, antes do início da fissuração. Para todos os casos, os valores máximos de tensão foram atingidos até 0,2 mm de deformação, o que mostra uma forte contribuição das transferências de tensões por entre as fissuras devido à presença de fibras e de reforço transversal, no caso do CR. Nota-se que um volume de 0,5% de fibras não foi capaz de influenciar significativamente o comportamento do material, ao passo que, para 1,5% de fibras, houve um acréscimo de resistência residual para deslocamentos um pouco maiores.

Figura 25 – Deslocamento vertical da fissura



Fonte: Autoria própria (2024)

Dessa forma, é possível afirmar que o comportamento pós-fissuração, ou seja, a existência de tensões residuais após maiores aberturas e deslocamentos de fissuras é dependente do volume de fibras, de maneira que, com o aumento da quantidade de fibras utilizadas, tal comportamento é melhorado. Assim, corroborando com Araújo, Lobo e Martins (2021), nota-se que volumes superiores a 0,5% de fibras melhoram a resistência residual do material.

O comportamento anômalo observado pelo CR2 é explicado pelo fato de, no momento do ensaio, o corpo de prova ter sido levado à ruína total, como exposto na Figura 26.



Fonte: Autoria própria (2024)

4.3.2 Estimativas teóricas

Para avaliar as estimativas de resistência de cisalhamento última, foram utilizados equacionamentos obtidos da literatura, que estão dispostos na Tabela 1, previamente comentada. Também foram utilizadas recomendações normativas, conforme descrito no item 2.2.3. Os dados necessários para a aplicação nas equações, estão dispostos na Tabela 14 e os valores estimados, bem como os valores médios obtidos experimentalmente estão dispostos na Tabela 15. A Figura 27 mostra os resultados obtidos pelas análises RMSE e DPC.

Tabela 15 – Dados para equações

Dados	Valores utilizados	Legenda
A_s (mm ²)	31,17	Área de armadura no plano transversal
A_c (mm ²)	20000	
ρ_y	0,16%	Taxa de armadura transversal à interface
f_y (MPa)	500	Escoamento do aço
f_c (MPa)	26,08	
$tg\phi$	1,7	Coefficiente de atrito – concreto monolítico
k	0,6	Concreto monolítico
λ	1	Concreto convencional
K_1	2,8	Concreto convencional
σ_n (MPa)	0	Tensão normal externa ao plano da junta
μ	1,4	Coefficiente de atrito – concreto monolítico
f_{cc} (MPa)	27,71	
f_{ck} (MPa)	23,55	
C_f	1	Efetividade do agregado – não rompeu
w (mm)	0,999	Largura da fissura
δ (mm)	1,302	Deslocamento da fissura

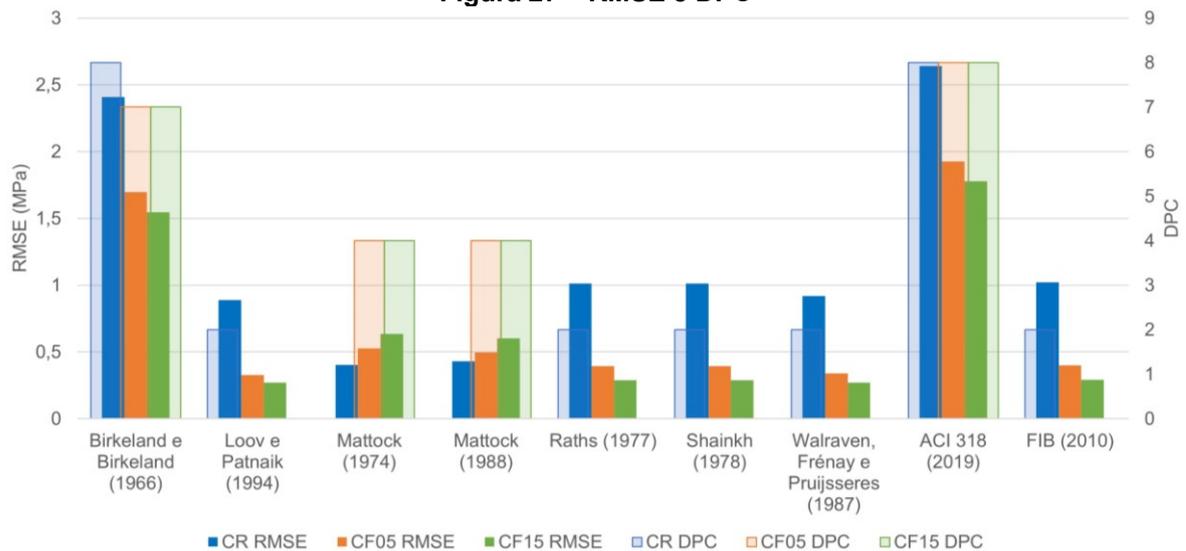
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 16 – Resistências ao cisalhamento

Valores	Autor ou mistura	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\frac{\tau_{CR}}{\tau_{m\acute{a}x}}$	$\frac{\tau_{CF05}}{\tau_{m\acute{a}x}}$	$\frac{\tau_{CF15}}{\tau_{m\acute{a}x}}$
Calculados	Birkeland e Birkeland (1966)	1,32	2,82	2,27	2,16
	Loov e Patnaik (1994)	2,87	1,30	1,04	0,99
	Mattock (1974)	3,42	1,09	0,87	0,83
	Mattock (1988)	3,39	1,10	0,88	0,84
	Raths (1977)	2,75	1,35	1,09	1,04
	Shainkh (1978)	2,74	1,36	1,09	1,04
	Walraven, Frénay e Pruijsseres (1987)	2,84	1,31	1,05	1,00
	ACI 318 (2019)	1,09	3,41	2,74	2,61
	FIB (2010)	2,74	1,36	1,09	1,04
	Experimentais	CR	3,72		
CF0,5		2,99			
CF1,5		2,85			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 27 – RMSE e DPC



Fonte: Autoria própria (2024)

A partir dos valores estimados de tensão de cisalhamento máxima, pode-se afirmar que todas as equações se mostraram conservadoras para o CR, uma vez que apresentaram valores de resistência inferiores aos obtidos experimentalmente. O equacionamento que mais se aproximou do resultado experimental do CR foi o proposto por Mattock (1974), com relação valor experimental por valor estimado igual a 0,92. Já o equacionamento cujo valor estimado foi o mais conservador é o proposto pela ACI 318 (2019).

Como todos os equacionamentos, exceto o proposto pelo FIB (FIB, 2010), levam em consideração a armadura que atravessa o plano de cisalhamento, seus valores deveriam ser comparados apenas com o CR, uma vez que é a única mistura com a qual utilizou-se a armadura transversal mínima requerida por norma. Entretanto, nota-se que as misturas com fibras, apesar de atingirem resistências ao cisalhamento inferiores à obtida pelo CR, resultaram em valores de tensão dentro da faixa de valores estimados.

A resistência do CF0,5 e do CF1,5 superaram os valores estimados de acordo com os equacionamentos propostos por Birkeland e Birkeland (1966), Raths (1977), Shainkh (1978) e Walraven, Frénay e Puijsseres (1987). As tensões máximas estimadas pelas normativas também foram inferiores à obtidas experimentalmente pelo concreto reforçado com fibras. Dessa forma, boa parte das equações propostas se mostraram conservadoras não só ao concreto convencional com reforço na área cisalhada, como também às misturas de concreto com fibras, sem a armadura transversal.

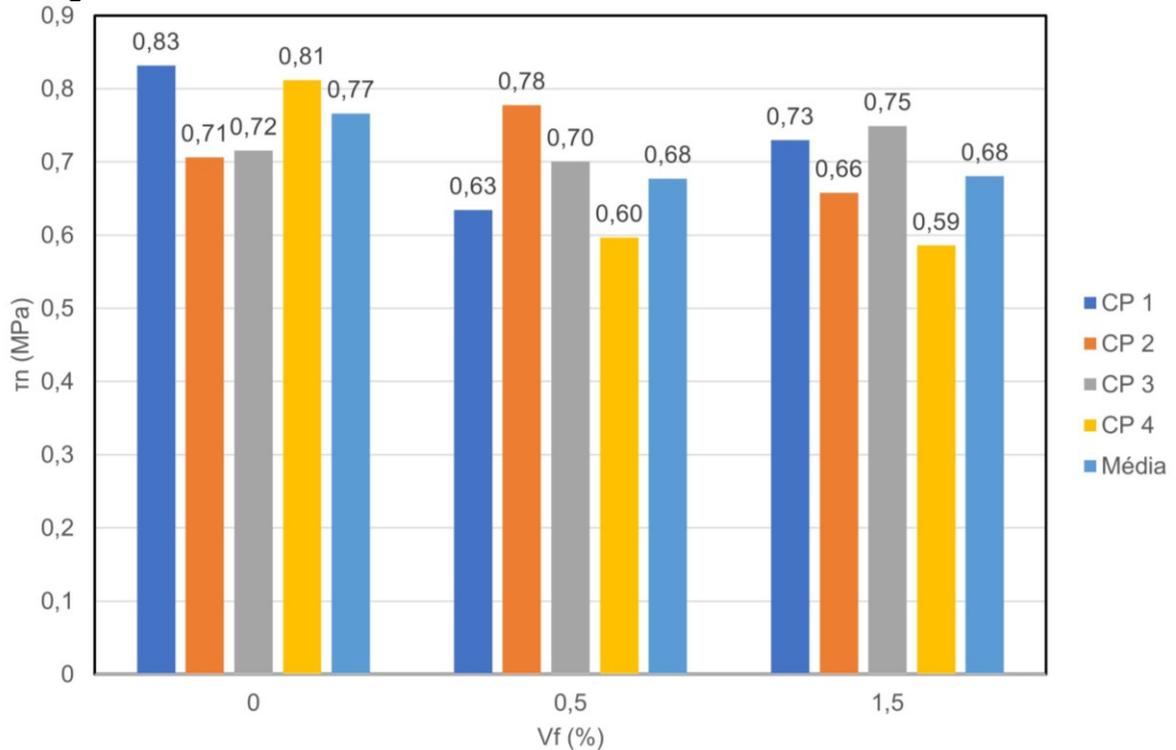
A partir da Figura 27, nota-se que as equações com maior erro – todas acima de 1,5 MPa – são as propostas por Birkeland e Birkeland (1966) e pela ACI 318 (2019). As mesmas equações, receberam também as maiores penalidades – todas acima de 6 –, uma vez que apresentaram um superdimensionamento do elemento, quando comparado com os resultados de laboratório. Por outro lado, conforme exposto anteriormente, Mattock (1974) propôs o modelo mais próximo da realidade para o CR, com penalidade 0, ou seja, de segurança apropriada e menor RMSE. Já para o CF0,5 e o CF1,5, as equações que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram as propostas por Loov e Patnaik (1994) e por Walraven, Frénay e Pruijsseres (1987), ambas apresentaram penalidade igual a 0 e RMSE inferior a 0,35 MP e 0,30 MPa, para o CF0,5 e CF1,5, respectivamente.

4.3.3 Tensão de cisalhamento normalizada

A tensão normalizada, calculada conforme a Equação 1 é utilizada para comparar a resistência ao cisalhamento de concretos com diferentes resistências à compressão. Como nesse estudo houve variação entre as resistências à compressão das misturas, a tensão normalizada foi calculada com o intuito de avaliar apenas o efeito da adição de fibras e sua possível utilização na substituição da armadura mínima. Na Figura 28 são apresentados os valores de tensão de cisalhamento normalizada e sua relação com os volumes de fibras avaliados.

Ao observar os valores médios, nota-se que a diferença dos resultados normalizados é inferior aos valores obtidos dos ensaios de resistência a compressão e de cisalhamento direto. Antes, para a compressão, a adição de fibras acarretou uma redução da resistência do concreto na faixa de 20% a 30%, aproximadamente, e para o ensaio de push-off a redução da resistência foi na faixa de 20%, aproximadamente. No caso dos valores de resistência ao cisalhamento normalizados, a redução com relação à utilização ou não de fibras foi de 11%, para ambos os volumes de fibra adicionados. Apesar dessa redução, a partir da aplicação do teste t de Student, pode-se afirmar que as resistências ao cisalhamento normalizadas não apresentam diferença estatística, uma vez que os p-valores obtidos foram superiores a 0,05, correspondente ao nível de significância.

Figura 28 – Tensões de cisalhamento normalizadas relacionadas ao volume de fibras



Fonte: Autoria própria (2024)

Pela maior proximidade entre as médias dos valores normalizados, verifica-se uma maior influência da resistência à compressão da mistura na resistência ao cisalhamento direto, do que do teor fibras em si. Isto sugere que adições de 0,5% e 1,5% produziram resultados semelhantes, visto que a resistência está vinculada a um mecanismo diferente do teor de fibras adotado. Ademais, Picazo (2021) notou que a resistência ao cisalhamento depende muito mais da matriz do concreto do que das fibras utilizadas. No entanto, destaca-se que uma quantidade maior de amostras precisa ser avaliada para que essa hipótese possa ser confirmada.

5 CONCLUSÕES

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho buscaram avaliar o efeito da adição de diferentes percentuais de macro fibras sintéticas na mistura do concreto, quanto a trabalhabilidade no estado fresco e quanto as resistências à compressão e à tração na flexão. A pesquisa também avaliou a aplicabilidade de equações propostas na literatura e em normativas para estimar a resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com macro fibras sintéticas e verificou a possibilidade de substituição da armadura transversal mínima em elementos de concreto armado por macro fibras.

A partir dos ensaios elaborados nesta pesquisa, foi possível notar a influência negativa das fibras no concreto em seu estado fresco, uma vez que afetam significativamente a trabalhabilidade do material para todos os traços. Notou-se, também que, no estado endurecido a adição de fibras resultou na redução da capacidade resistente do material, tanto com relação à compressão e à tração na flexão, como ao cisalhamento.

Apesar na redução dos valores de resistências, foi possível verificar que, especialmente para maiores volumes de fibras (1,5%), houve uma melhoria do comportamento pós-fissuração do material, onde as fibras foram capazes de transferir tensões por entre as fissuras e, conseqüentemente, proporcionar tensões residuais ao material em maiores aberturas e deslocamentos de fissuras, no caso do teste de cisalhamento e maiores aberturas de entalhe, no caso do teste de tração na flexão. Tal comportamento contribuiu para a redução da fragilidade do material, apesar de a ruptura ainda se dar de forma frágil.

Com relação aos equacionamentos, ao compará-los com os resultados experimentais do concreto de referência, concluiu-se que eles se mostraram conservadores, o que é favorável à segurança de estrutura, uma vez que estimaram valores inferiores ao real. Notou-se que os valores experimentais para o CF0,5 e para o CF1,5 se mantiveram dentro da faixa de valores estimados, o que indica uma possível aplicabilidade dos equacionamentos para tais misturas.

A partir dos valores normalizados de resistência ao cisalhamento, percebeu-se uma influência maior da resistência à compressão no desempenho das misturas avaliadas, do que da ação das fibras em si. Por fim, a substituição da armadura transversal mínima por macro fibras sintéticas deve ser mais bem analisada em

trabalhos futuros, pois apesar de as misturas do tipo CF superarem a resistência mínima exigida por norma e se enquadrarem na faixa das resistências ao cisalhamento estimadas para CR, a mistura de referência apresentou melhor desempenho geral de acordo com os parâmetros avaliados nessa pesquisa.

Para estudos futuros, sugere-se avaliar a alteração de outros parâmetros da mistura, como matriz cimentícia, variando volumes de finos, por exemplo, e fibras de outros materiais, ou até mesmo a hibridização de fibras de diferentes materiais ou geometrias. Outras sugestões seriam avaliar o comportamento do material considerando a variação de temperatura e estudar a formulação de equacionamentos para estimativa de tensões últimas de cisalhamento que levem em consideração as fibras de diferentes materiais. Por fim, sugere-se estudar a influência das fibras na interface entre a pasta cimentícia e os agregados, avaliando o comportamento da estrutura sujeita a esforços de compressão.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. **Construction and Building Materials**, v. 333, p. 127353, maio 2022.
- AHMED, L.; ANSELL, A. Direct shear strength of high-strength fibre concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 5, p. 379–390, maio 2010.
- ALANI, A. M.; BECKETT, D. Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 335–344, abr. 2013.
- ALBERTI, M. G. *et al.* New Methodological Approach towards a Complete Characterization of Structural Fiber Reinforced Concrete by Means of Mechanical Testing Procedures. **Applied Sciences**, v. 10, n. 14, p. 4811, 13 jul. 2020.
- ALGIN, Z.; GERGINCI, S. Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117382, fev. 2020.
- ALHASSAN, M. *et al.* Estimation of the fracture parameters of macro fiber-reinforced concrete based on nonlinear elastic fracture mechanics simulations. **Results in Engineering**, v. 15, p. 100539, set. 2022.
- ALIMRANI, N. S.; BALAZS, G. L. Toughness and stiffness of fibre reinforced concrete in terms of shear capacity. **Construction and Building Materials**, v. 389, p. 131711, jul. 2023.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.4R-18: Guide to design with fiber-reinforced concrete**. Farmington Hills, 2018.
- _____. **ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Detroit, USA, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7508/D7508M-10 - Specification for polyolefin chopped strands for use in concrete**, 2015a.
- _____. **ASTM C1399: Standard test method for obtaining average residual strength of fiber reinforced concrete**. USA, 2015b.
- ARAÚJO, D. DE L.; LOBO, F. A.; MARTINS, B. G. A shear stress-slip relationship in steel fibre-reinforced concrete obtained from push-off testing. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123435, jul. 2021.
- ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 1997.
- ARAÚJO, D. L.; DEBS, M. K. EL. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão** *Cadernos de Engenharia de Estruturas* São Carlos, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009a.

____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009b.

____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2021a.

____. **NBR 16939: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo punção - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021b.

____. **NBR 16940: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021c.

____. **NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto - Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021d.

____. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.

BADOGIANNIS, E. G.; CHRISTIDIS, K. I.; TZANETATOS, G. E. Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 443–456, jan. 2019.

BANTHIA, N. *et al.* Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 91–97, abr. 2014.

BARROS, J. A. O.; FIGUEIRAS, J. A. Flexural behavior of SFRC: Testing and Modeling. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, n. 4, p. 331–339, 1999.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 1. ed. Londres: Elsevier, 1990.

BIRKELAND, P. W.; BIRKELAND, H. W. Connections in precast concrete construction. **Journal of American Concrete Institute**, v. 63, p. 345–367, 1966.

BLANCO, A. *et al.* Luong test for the characterization of the shear post-cracking response of fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 207–217, set. 2017.

- BOMARITO, G. F. *et al.* Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 91, p. 73–85, 1 abr. 2017.
- BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. DE C.; PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.
- BOŠNJAK, J.; SHARMA, A.; GRAUF, K. Mechanical Properties of Concrete with Steel and Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures. **Fibers**, v. 7, n. 2, p. 9, 24 jan. 2019.
- BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, n. 1–3, p. 3–9, nov. 2008.
- CAMARGO, M. M. DE. **Análise do comportamento de blocos de concreto reforçado com fibras de aço sobre estacas submetidos à ação de força centrada**. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, 2021.
- CAMILLE, C. *et al.* Performance behaviour of macro-synthetic fibre reinforced concrete subjected to static and dynamic loadings for sleeper applications. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121469, fev. 2021.
- COLLINS, M. P. **Evaluation of shear design procedures for concrete structures**. Ottawa, CSA Technical Committee on Reinforced Concrete Design, , 2001.
- CONFORTI, A. *et al.* Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 63, p. 1–11, mar. 2017.
- CUENCA, E.; SERNA, P. Shear Behavior of Self-Compacting Concrete and Fiber-Reinforced Concrete Push-Off Specimens. *Em: Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 429–438.
- DIAS-DA-COSTA, D. *et al.* **Monitorização estrutural até à rotura aplicando técnicas de pós-processamento de dados obtidos por Fotogrametria**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/236941958>>.
- DING, Y. *et al.* Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 456–469, jun. 2016.
- EFNARC. **European Specification for Sprayed Concrete**. Hampshire, UK European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), , 1996.
- EVANS, J. R. **Statistics, data analysis and decision modeling**. 5. ed. London: Pearson, 2013.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: [s.n.].
- FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- FRENCH, R. *et al.* Direct shear behavior in concrete materials. **International Journal of Impact Engineering**, v. 108, p. 89–100, 1 out. 2017.

- GHALI, A. E. AL *et al.* Comparative study on shear strength and life cycle assessment of reinforced concrete beams containing different types of fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, p. e02497, dez. 2023.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GONZÁLEZ FONTEBOA, B. *et al.* Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, v. 60, n. 299, p. 53–67, 30 set. 2010.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). **The fib Model Code for Concrete Structures 2010** Lausanne, Switzerland. International Federation for Structural Concrete, 2010.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. Concrete library of JSCE, , 1984.
- JEN, G.; TRONO, W.; OSTERTAG, C. P. Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 63–71, fev. 2016.
- KARIM, R.; SHAFEI, B. Ultra-high performance concrete under direct tension: Investigation of a hybrid of steel and synthetic fibers. **Structural Concrete**, v. 25, n. 1, p. 423–439, 7 fev. 2024.
- KOBAYASHI, K.; CHO, R. Flexural characteristics of steel fibre and polyethylene fibre hybrid-reinforced concrete. **Composites**, p. 164–168, 1982.
- LAKAVATH, C.; SURIYA PRAKASH, S.; DIRAR, S. Experimental and numerical studies on shear behaviour of macro-synthetic fibre reinforced prestressed concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123313, jul. 2021.
- LANTSOGHT, E. Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. **Materials**, v. 12, n. 6, p. 917, 19 mar. 2019.
- LANTSOGHT, E. O. L. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? **Composites Part B: Engineering**, v. 175, p. 107079, out. 2019.
- LANZONI, L.; NOBILI, A.; TARANTINO, A. M. Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 798–806, mar. 2012.
- LI, J.; WU, C.; LIU, Z.-X. Comparative evaluation of steel wire mesh, steel fibre and high performance polyethylene fibre reinforced concrete slabs in blast tests. **Thin-Walled Structures**, v. 126, p. 117–126, maio 2018.
- LIU, X. *et al.* Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 103, p. 103506, set. 2020.
- LOOV, R. E.; PATNAIK, A. K. Horizontal shear strength of composite concrete beams with rough interface. **PCI Journal**, p. 48–69, 1994.
- MANSUR, M. A.; VINAYAGAM, T.; TAN, K.-H. Shear Transfer across a Crack in Reinforced High-Strength Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 4, p. 294–302, abr. 2008.

- MAST, R. F. Auxiliary reinforcement in precast concrete connections. **ASCE**, p. 1495–1504, 1968.
- MATTOCK, A. H. Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane. **American Concrete Institute**, v. Special Publication, p. 17–42, 1974.
- _____. Reader comments of: Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete member. **PCI Journal**, v. 33, n. 1, p. 165–170, 1988.
- MATTOCK, A. H. Shear friction and High-Strength Concrete. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 1, p. 50–59, 2001.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NAVIDI, W. **Probabilidade e estatística para ciências exatas**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- ORTIZ NAVAS, F. *et al.* An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 888–899, abr. 2018.
- OZTURK, O.; ATAHAN, H. N.; OZYURT, N. Effects of Synthetic Fibers on the Mechanical Properties and Thickness Requirements of Roller-Compacted Concrete for Pavements. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 148, n. 4, dez. 2022.
- PICAZO, A. *et al.* Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 565–578, 30 ago. 2018.
- _____. Shear slip post-cracking behaviour of polyolefin and steel fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, 5 jul. 2021.
- QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. DE A.; FILHO, R. D. T. Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 54, p. 100–109, nov. 2014.
- RATHS, C. H. Reader Comments on “Designs proposals for reinforced concrete corbels” by A.H. Mattock. **PCI Journal**, v. 22, p. 93–98, 1977.
- RAUECKER, J. C. N. *et al.* Uma abordagem experimental e numérica para determinação de curvas de compressão para concreto simples e reforçados com fibras de aço. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, 2019.
- RESENDE, T. L.; CARDOSO, D. C. T.; SHEHATA, L. C. D. Experimental and theoretical investigation on the stress transfer across cracks due to combined action of steel fibers and aggregate interlock. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, 1 nov. 2021.
- RILEM TC 162. Final recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete -design method. **Materials and Structures**, v. 36, p. 560–657, 2003.

- SAGASETA, J.; VOLLUM, R. L. Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 2, p. 119–137, 2011.
- SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 2, p. 1273–1285, 2013.
- SANTOS, A. H. A. *et al.* Study of size effect using digital image correlation. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 323–340, jun. 2015.
- SANTOS, P. M. D. **Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2009.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. Interface Shear Transfer on Composite Concrete Members. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 1, p. 113–121, 2014.
- SAVARIS, G. **Resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- SAVARIS, G.; PINTO, R. C. DE A. Shear friction capacity of self-consolidating concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 1, 2021.
- SHAIKH, A. F. Proposed revisions to shear-friction provisions. **PCI Journal**, v. 23, p. 12–21, 1978.
- SLOBBE, A. T.; HENDRICKS, M. A. N.; ROTS, J. G. Sequentially linear analysis of shear critical reinforced concrete beams without shear reinforcement. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 50, p. 108–124, 2012.
- SNEED, L. H.; RAMIREZ, J. L. Influence on effective depth on shear strength of concrete beams - Experimental Study. **ACI Structural Journal**, v. 107, n. 5, p. 554–562, 2010.
- SOETENS, T.; MATTHYS, S. Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 1–13, set. 2017.
- SOUSA, J. B.; GARCIA, S. L. G.; PIEROTT, R. M. R. Shear Behavior of Recycled Coarse Aggregates Concrete Dry Joints Keys Using Digital Image Correlation Technique. **Infrastructures**, v. 8, n. 3, p. 60, 20 mar. 2023.
- SOUZA, F. R. **Concreto reforçado com fibras de PVA aplicado a pavimentos aeroportuários: propriedades mecânicas e dimensionamento**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2021.
- STANTON, J. M. Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors. **Journal of Statistical Education**, v. 9, n. 3, 2001.
- TEC MACHINE. **Especificação técnica**. Disponível em: <<https://www.tecmachinefm.com.br/macro-fibra-sintetica-robustech-43>>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- TIBERTI, G. *et al.* An overview of the flexural post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 19, n. 3, p. 695–718, jun. 2018.
- TORRES, H. R. **Influência do teor de fibras de aço no comportamento ao atrito-cisalhamento de concretos com agregados reciclados**. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2019.

TURETTA, K. V *et al.* **Utilização de resíduos de construção para produção de concreto**XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica. **Anais...**Guarapuava, PR: Anais do XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, 2021

UYGUNOĞLU, T. Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 41, n. 8, p. 1441–1449, 4 out. 2008.

WALRAVEN, J. C. **Aggregate interlock: A theoretical and experimental analysis**. The Netherlands: Technische Hogeschool Delft, 1980.

WALRAVEN J. C.; REINHARDT H. W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. **Heron**, v. 26, n. 1A, 1981.

WALRAVEN, J.; FRÉNAY, J.; PRUIJSSERES, A. Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members. **PCI Journal**, p. 6, 1987.

WANG, W. *et al.* A critical review on the properties of natural fibre reinforced concrete composites subjected to impact loading. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107497, out. 2023.

YAN, X. *et al.* Mechanical performance study of basalt-polyethylene fiber reinforced concrete under dynamic compressive loading. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133935, dez. 2023.

ZHANG, C.; HAN, S.; HUA, Y. Flexural performance of reinforced self-consolidating concrete beams containing hybrid fibers. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 11–23, jun. 2018.

ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, v. 20, p. 185–210, 1995.

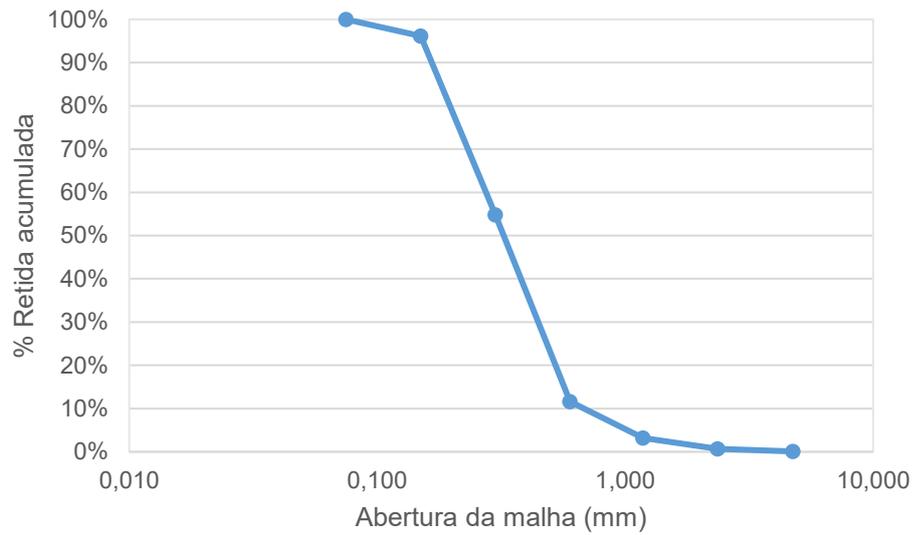
APÊNDICE A - Curvas granulométricas dos agregados

Tabela A. 1 - Granulometria: porcentagem de material retido acumulado

Peneira (mm)	Areia	Brita 1
25,000	-	-
19,000	-	2,81%
12,500	-	61,38%
9,500	-	95,76%
4,750	0,1%	99,64%
2,360	0,7%	99,78%
1,180	3,2%	99,79%
0,600	11,6%	99,80%
0,300	54,8%	99,82%
0,150	96,1%	99,86%
0,075	100,0%	100,00%

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura A. 1 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria (2024)

